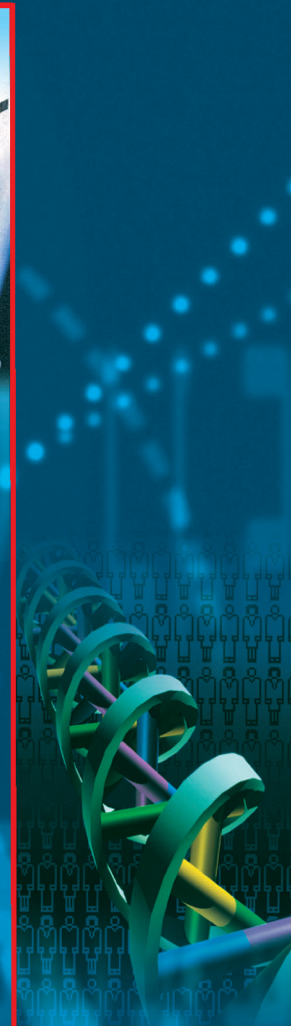


МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ



Том 18
2017
№ 12

Рисунки к статье В. М. Лохина, С. В. Манько, С. А. Карпова, И. Д. Марголина
**«ПОВЕДЕНЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕТЕВОЙ СВЯЗИ
 В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»**



а)

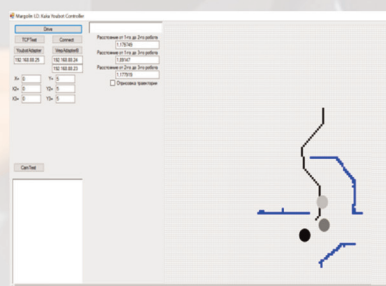


б)

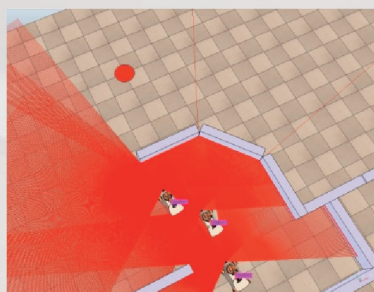


в)

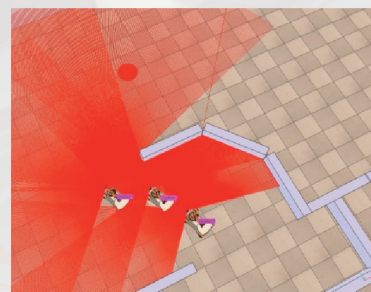
Рис. 6. Мобильный робот *KUKA YouBot* с бортовым комплектом информационно-измерительных средств: автономная транспортная платформа (а); лазерный сканирующий дальномер *Hokuyo URG 04LX UG01* (б); беспроводная точка доступа *MikroTik OmniTik UPA-5HnD* (в)



а)



б)



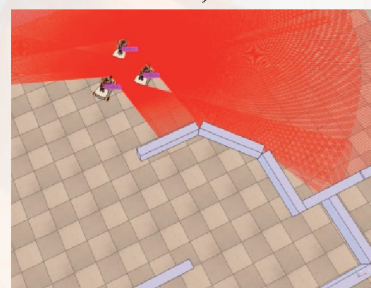
в)



г)



д)



е)

Рис. 8. Фрагменты моделирования МАРС на базе роботов *KUKA YouBot* (*KUKA Roboters, Germany*) в среде *V-REP* (*Coppelia Robotics, Switzerland*): построение маршрута целенаправленного перемещения робототехнической группировки в среде с препятствиями (а); целенаправленное движение группы роботов вдоль формируемого маршрута с учетом ограничений на их взаимную удаленность (б – е)

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 18

2017

№ 12

Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Редакционный совет:

CHYI-YEU LIN, PhD, prof.
GROUMPOS P. P., prof.
JEN-HWA GUO, PhD, prof.
KATALINIC B., PhD, prof.
SUBUDHI B., PhD, prof.
АЛИЕВ Т. А., акад. НАНА, проф.
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН, проф.
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН, проф.
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН, проф.
ЖЕЛТОВ С. Ю., акад. РАН, проф.,
КАЛЯЕВ И. А., акад. РАН, проф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г., чл.-корр. НАНБ, проф.
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН, проф.
ЛЕОНОВ Г. А., чл.-корр. РАН, проф.
МАТВЕЕНКО А. М., акад. РАН, проф.
МИКРИН Е. А., акад. РАН, проф.
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН, проф.
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
СЕБЯЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН, проф.
СИГОВ А. С., акад. РАН, проф.
СОЙФЕР В. А., акад. РАН, проф.
СОЛОВЬЕВ В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН, проф.
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН, проф.
ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН, проф.
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН, проф.
ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН, проф.

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с. н. с.

Заместители гл. редактора:

ПОДУРАЕВ Ю. В., д. т. н., проф.
ПУТОВ В. В., д. т. н., проф.
ЮЩЕНКО А. С., д. т. н., проф.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В., д. ф.-м. н., проф.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М., д. т. н., проф.
БУКОВ В. Н., д. т. н., проф.
ВИТТИХ В. А., д. т. н., проф.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г., д. т. н., проф.
ЕРМОЛОВ И. Л., д. т. н., доц.
ИВЧЕНКО В. Д., д. т. н., проф.
ИЛЬЯСОВ Б. Г., д. т. н., проф.
КОЛОСОВ О. С., д. т. н., проф.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д. т. н., проф.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д. т. н., проф.
ЛОХИН В. М., д. т. н., проф.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е., д. ф.-м. н., проф.
ПРОХОРОВ Н. Л., д. т. н., проф.
ПШИХОПОВ В. Х., д. т. н., проф.
РАПОПОРТ Э. Я., д. т. н., проф.
СЕРГЕЕВ С. Ф., д. пс. н., с. н. с.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д. т. н., проф.
ФРАДКОВ А. Л., д. т. н., проф.
ФУРСОВ В. А., д. т. н., проф.
ЮРЕВИЧ Е. И., д. т. н., проф.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Иванников А. Д. Формирование отладочного набора тестов для проверки функций цифровых систем управления объектами 795

МЕХАТРОННЫЕ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Лохин В. М., Манько С. В., Карпов С. А., Марголин И. Д. Поведенческие механизмы обеспечения сетевой связи в мультиагентных робототехнических системах . . 802

Ющенко А. С. Коллаборативная робототехника: состояние и новые задачи 812

Градецкий В. Г., Ермолов И. Л., Князьков М. М., Семенов Е. А., Суханов А. Н. Силовое взаимодействие мобильного нагруженного робота с грунтом 819

Сергеев С. Ф. Методологический базис проектирования симбиотических сред тренажеров мехатронных и робототехнических систем 824

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Городецкий В. И., Бухвалов О. Л. Самоорганизующиеся производственные В2В-сети. Часть 2. Архитектура и алгоритмическая поддержка 829

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Саханский С. П. Управление выращиванием кристаллов лейкосапфира 840

УПРАВЛЕНИЕ В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ

Сапунков Я. Г., Молоденков А. В. Квазиоптимальный алгоритм разворота осесимметричного космического аппарата при произвольных граничных условиях. 847

Петрищев В. Ф. Энергосберегающее управление плоскостными параметрами орбиты геостационарного космического аппарата с помощью двигателя малой регулируемой тяги 855

Указатель статей, опубликованных в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" в 2017 г. 862

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: mech@novtex.ru

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL

Vol. 18

2017

No. 12

MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editorial Council:

ALIEV T. A., prof., Azerbaijan, Baku
 ANSHAKOV G. P., Russia, Samara
 BOLOTNIK N. N., Russia, Moscow
 CHENTSOV A. G., Russia, Ekaterinburg
 CHERNOUSKO F. L., Russia, Moscow
 CHYI-YEU LIN, PhD, Prof., Taiwan, Taipei
 FEDOROV I. B., Russia, Moscow
 GROUMPOS P. P., prof., Greece, Patras
 JEN-HWA GUO, PhD, Prof., Taiwan, Taipei
 KALYAEV I. A., Russia, Taganrog
 KATALINIC B., PhD, Prof., Austria, Vienna
 KRASNEVSKIY L. G., Belarus, Minsk
 KUZNETSOV N. A., Russia, Moscow
 LEONOV G. A., Russia, S.-Peterburg
 MATVEENKO A. M., Russia, Moscow
 MIKRIN E. A., Russia, Moscow
 PESHEKHONOV V. G., Russia, S.-Peterburg
 REZCHIKOV A. F., Russia, Saratov
 SCHERBATYUK A. F., Russia, Vladivostok
 SEBRYAKOV G. G., Russia, Moscow
 SIGOV A. S., Russia, Moscow
 SOJFER V. A., Russia, Samara
 SOLOMENTSEV Yu. M., Russia, Moscow
 SOLOVJEV V. A., Russia, Moscow
 SUBUDHI B., PhD, Prof., India, Sundargarh
 VASILYEV S. N., Russia, Moscow
 YUSUPOV R. M., Russia, S.-Peterburg
 ZHELTOV S. Yu., Russia, Moscow

Editor-in-Chief:

FILIMONOV N. B., Russia, Moscow

Deputy Editor-in-Chief:

PODURAEV Yu. V., Russia, Moscow
 PUTOV V. V., Russia, S.-Peterburg
 YUSCHENKO A. S., Russia, Moscow

Responsible Secretary:

BEZMENOVA M. Yu., Russia, Moscow

Editorial Board:

ALEXANDROV V. V., Russia, Moscow
 ANTONOV B. I., Russia, Moscow
 ARSHANSKY M. M., Russia, Tver
 BUKOV V. N., Russia, Zhukovsky
 ERMOLOV I. L., Russia, Moscow
 FILARETOV V. F., Russia, Vladivostok
 FRADKOV A. L., Russia, S.-Peterburg
 FURSOV V. A., Russia, Samara
 GRADETSKY V. G., Russia, Moscow
 ILYASOV B. G., Russia, Ufa
 IVCHENKO V. D., Russia, Moscow
 KOLOSOV O. S., Russia, Moscow
 KOROSTELEV V. F., Russia, Vladimir
 LEBEDEV G. N., Russia, Moscow
 LOKHIN V. M., Russia, Moscow
 PAVLOVSKY V. E., Russia, Moscow
 PROKHOROV N. L., Russia, Moscow
 PSYKHOPOV V. Kh., Russia, S.-Peterburg
 RAPOPORT E. Ya., Russia, Samara
 SERGEEV S. F., Russia, S.-Peterburg
 VITTIKH V. A., Russia, Samara
 YUREVICH E. I., Russia, S.-Peterburg

Editorial Staff:

GRIGORIN-RYABOVA E. V., Russia, Moscow

The mission of the Journal is to cover the current state, trends and perspectives development of *mechatronics*, that is the priority field in the technosphere as it combines mechanics, electronics, automatics and informatics in order to improve manufacturing processes and to develop new generations of equipment. Covers topical issues of development, creation, implementation and operation of mechatronic systems and technologies in the production sector, power economy and in transport.

CONTENTS

METHODS OF THE THEORY OF AUTOMATIC CONTROL

- Ivannikov A. D. Debugging Input Set Generation for Testing of Control Digital Systems Functions. 795

MECHATRONIC AND ROBOTIC SYSTEMS

- Lokhin V. M., Man'ko S. V., Karpov S. A., Margolin I. D. Behavioral Mechanisms Ensuring Network Communications in Multi-Agent Robotic Systems 802
 Yuschenko A. S. Collaborative Robotics — State of Art and New Problems 812
 Gradetskiy V. G., Ermolov I. L., Knyazkov M. M., Semenov E. A., Sukhanov A. N. Force Interaction between Soil and Loaded UGV 819
 Sergeev S. F. Methodological Basis of Symbiotic Design Environments Simulators for Mechatronic and Robotic Systems 824

AUTOMATION OF PRODUCTION

- Gorodetsky V. I., Bukhvalov O. L. Self-Organized B2B Production Networks. Part 2. Architecture and Algorithmic Support 829

CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

- Sakhansky S. P. Control of Cultivation of Leicosapphir Crystals 840

CONTROL IN AEROSPACE SYSTEMS

- Sapunkov Ya. G., Molodenkov A. V. Quasioptimal Algorithm of Turn of an Axially Symmetric Spacecraft under Arbitrary Boundary Conditions. 847
 Petrishchev V. F. Power-Efficient Control of Plane Parameters of a Geostationary Spacecraft's Orbit Using an Adjustable Low-Thrust Rocket Engine 855

Information about the journal is available online at:
<http://novtex.ru/mech.html>, e-mail: mech@novtex.ru

А. Д. Иванников, д-р техн. наук, зам. директора по научной работе, adi@ippm.ru,
Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

Формирование отладочного набора тестов для проверки функций цифровых систем управления объектами¹

Рассматриваются управляющие цифровые системы, функционирование которых может быть представлено в виде выполнения последовательности функций из конечного алфавита. Для отладки проектов таких систем методом моделирования необходимо формирование минимального полного в смысле определенного критерия набора тестовых воздействий на моделируемую систему для проверки правильности ее функционирования. Управляющие цифровые системы моделируются на уровне логических сигналов, которыми они обмениваются с внешней средой, в том числе с управляемыми объектами. В качестве входных данных для моделирования используются входные взаимодействия, включающие как собственно входные сигналы, так и выходные сигналы управления обменом. Предлагается алгоритм формирования минимально полного набора тестов для отладки проектов, основанный на задаваемых разработчиком классах эквивалентности входных взаимодействий.

Ключевые слова: отладка методом моделирования, логическое моделирование цифровых систем, отладочные тесты

Введение

Будем рассматривать проектирование цифровых систем, реализуемых в виде аппаратного обеспечения (одна или несколько интегральных схем) и программного обеспечения, которые в реальном времени осуществляют управление работой некоторого устройства: промышленного робота, технологической установки, бытовой техники и др. При проектировании таких систем для отладки проектов широко используется метод моделирования. На компьютерную модель цифровой системы подаются некоторые входные воздействия, а реакция модели проектируемой системы проверяется на соответствие техническому заданию.

При этом важной задачей является выбор конечного числа конечных по времени тестовых входных взаимодействий (тестовых примеров). С ростом сложности проектируемых цифровых систем и, соответственно, с ростом сложности и длительности тестирования их проектов все более актуальной становится задача выбора минимального полного в определенном смысле набора тестов, правильное выполнение которого позволяет убедиться в отсутствии ошибок проектирования [1, 2]. При решении этой задачи вначале необходимо выбрать уровень модели цифровой управляющей системы. Обычно осуществляется декомпозиция задачи отладки проекта [3], прежде всего по типу выявляемых ошибок. Так, для верификации временных диаграмм обмена информацией между блоками используются модели цифровых элементов с многозначным представлением электрических сигналов [4]. Для

проверки правильности логического функционирования используются модели с булевым представлением сигналов на входах и выходах [1, 5]. Используются также различные высокоуровневые модели [6, 7].

Наиболее часто используемым подходом является введение некоторой модели неисправностей, которые должны быть исключены в результате отладки проекта [1, 8]. Существуют также подходы к проверке правильности функционирования цифровой системы на основе имеющейся формальной спецификации [1, 5, 9].

Целью настоящей работы является формализация выбора тестовых примеров для отладки проектов цифровых систем управления исходя из перечня выполняемых ими функций, что не требует наличия детализированной формальной спецификации на функционирование проектируемой цифровой системы.

Описание используемой модели цифровых систем управления

Взаимодействие цифровой системы с объектом управления и внешним миром вообще осуществляется через внешние линии и шины — наборы линий, по которым передается однородная информация, например адреса или данные. В цифровых системах управления широко используются двунаправленные шины и линии, имеющие также состояние с высоким выходным сопротивлением (отключенное состояние). Будем рассматривать логическую модель сигналов на шинах и линиях цифровых систем, т. е. считать, что значения сигналов представляются на линиях как 0 или 1 и как число из диапазона $0...2^n$ — на шинах системы. Цифровые сигналы P внешних шин и линий назовем терми-

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-07-00683.

нальными переменными, они составляют множество $\mathbf{P}$. Переменная $p \in \mathbf{P}$ всегда имеет одно из значений конечного множества $\mathbf{Z}_p$, элементы которого определяют как целочисленное значение сигнала, так и направленность работы шины или линии.

Событием по переменной p называется изменение переменной p со значения $z_1 \in \mathbf{Z}_p$ на значение $z_2 \in \mathbf{Z}_p$ в момент времени t . Обозначим такое событие χ_{p, z_1, z_2}^t . Взаимодействие цифровой системы

с внешней средой, включая управляемый объект, есть последовательность переключений сигналов на терминальных шинах и линиях, т. е. последовательность событий. Для каждой проектируемой системы имеется множество Ψ допустимых взаимодействий с внешней средой, каждое из которых есть отображение $\psi: [0, t) \rightarrow \mathbf{Q}$, $t \in \mathbf{T}$, $\mathbf{Q} = \prod_{p \in \mathbf{P}} \mathbf{Z}_p$.

В цифровых системах для каждого конечного временного интервала число событий по терминальным переменным, т. е. число изменений их значений, конечно. В связи с этим любое взаимодействие ψ может быть представлено в виде вектора $(z_{p_1}^n, \dots, z_{p_k}^n)$ начальных значений переменных $p_1, \dots, p_k$ (k — мощность множества $\mathbf{P}$) в момент времени $t = 0$ и последовательности событий по переменным множества $\mathbf{P}$ с конечным числом событий за любой конечный интервал времени.

Если в этой последовательности выделить только события, являющиеся изменениями входных сигналов, то такую последовательность можно назвать входным воздействием. Однако часто моменты подачи входных сигналов на цифровую систему определяются готовностью системы принять эти сигналы, на что указывают определенные выходные сигналы системы. Выполнение какой-либо операции, например считывания данных цифровой системой, может инициироваться не сигналами внешней среды, а самой системой. В связи с этим использование в качестве аргументов функционирования цифровой системы входных воздействий не всегда удобно.

Выделим из последовательности событий взаимодействия ψ последовательность входных событий и выходных событий управления обменом, которые по заданному протоколу обмена обуславливают моменты времени входных событий. Назовем эту последовательность входным взаимодействием

$$\mu = (z_{p_1}^n, \dots, z_{p_{n+q}}^n), \chi_{p_{i_1}, z_{j_1}, z_{j_2}}^{t_1}, \chi_{p_{i_2}, z_{j_3}, z_{j_4}}^{t_2}, \chi_{p_{i_3}, z_{j_5}, z_{j_6}}^{t_3}, \dots, \quad (1)$$

где $t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq \dots$ — упорядоченная последовательность времен событий; $p_{i_1}, p_{i_2}, p_{i_3}, \dots$ — переменные, принадлежащие множеству $\mathbf{P}$; $z_{j_1}, z_{j_3}, z_{j_5}, \dots$ — значения переменных непосредственно перед событием; $z_{j_2}, z_{j_4}, z_{j_6}, \dots$ — значения переменных непосред-

ственно после события; $\chi_{p_{i_1}, z_{j_1}, z_{j_2}}^{t_1}, \chi_{p_{i_2}, z_{j_3}, z_{j_4}}^{t_2}, \chi_{p_{i_3}, z_{j_5}, z_{j_6}}^{t_3},$

... — входные события и выходные события управления обменом; n — число входных переменных; q — число выходных переменных управления обменом.

В рассматриваемой модели в качестве аргументов функционирования цифровых систем используются входные взаимодействия, что дает возможность рассматривать режимы работы, инициируемые как внешними входными сигналами, так и самими цифровыми системами. Более подробно формальное представление допустимых взаимодействий цифровых систем рассмотрено в работах [3, 10].

Структура множества допустимых входных взаимодействий

Пусть для некоторой проектируемой цифровой системы заданы входные взаимодействия

$$\mu_1: [0, t_1) \rightarrow \mathbf{U} \times \mathbf{Y}^0, \mu_2: [0, t_2) \rightarrow \mathbf{U} \times \mathbf{Y}^0, \\ t_1 \in T_1, t_2 \in T_2,$$

где $\mathbf{U}$ — множество состояния выходных переменных; $\mathbf{Y}^0$ — множество состояния выходных переменных управления обменом. Определим произведение $\mu_1, \mu_2 = \mu_1 \cdot \mu_2, \mu_1, \mu_2: [0, t_1 + t_2) \rightarrow \mathbf{U} \times \mathbf{Y}^0$ как

$$\mu_1, \mu_2 = \mu_1 \cdot \mu_2 = \begin{cases} \mu_1(t) & \text{при } t \in [0, t_1); \\ \mu_2(t - t_1) & \text{при } t \in [t_1, t_1 + t_2), \end{cases}$$

также являющееся входным взаимодействием.

Тогда на множестве входных взаимодействий $\mathbf{M}$ определена в общем случае частичная мультипликативная полугруппа $\langle \mathbf{M}, \cdot \rangle$.

Практика показывает, что каждая цифровая система выполняет некоторую последовательность функций из конечного алфавита $\mathbf{K}$, причем выполнение каждой функции вызывается одним из входных взаимодействий определенного класса. Из этого утверждения следует, что полугруппа $\langle \mathbf{M}, \cdot \rangle$ имеет бесконечное множество $\bar{\mathbf{M}}$ порождающих элементов, причем $\bar{\mathbf{M}} = \bigcup_{k \in \mathbf{K}} \mathbf{M}^k$, где $\mathbf{M}^k$ — множество входных взаимодействий, обуславливающих выполнение цифровой системой функции k .

С точки зрения влияния на поведение цифровой системы различия двух входных взаимодействий μ_1 и μ_2 , $\mu_1 \in \bar{\mathbf{M}}$, $\mu_2 \in \bar{\mathbf{M}}$ могут быть в той или иной степени "невелики". Так, одно из входных взаимодействий может содержать, а другое не содержать одно или несколько безразличных событий, никак не влияющих на функционирование цифровой системы. Примером несущественного события может служить следующая ситуация. После того, как выполнено считывание информации с какого-либо входа, и до момента, когда цифровая система может опять обратиться к этому же источнику информации, сигнал на этом входе может переключиться в любое состояние или содержать любое число произвольных переключений. При другом критерии "близости" "почти одинаковыми" являются входные

взаимодействия, содержащие равное число событий, отличающихся только значениями ряда t_j в соотношении (1) в пределах допустимых ограничений. Могут быть рассмотрены и более крупные группы входных взаимодействий.

Представим множество значений данных $\mathbf{D}$ входных взаимодействий, обуславливающих выполнение цифровой системой определенной функции k ,

как $\mathbf{D} = \bigcup_{i=1}^n \mathbf{D}_i$, $\mathbf{D}_i \cap \mathbf{D}_j = \emptyset$ при $i \neq j$. В одну группу

входных взаимодействий могут быть отнесены взаимодействия, данные которых принадлежат одному и тому же подмножеству $\mathbf{D}_i$. Каждое подмножество $\mathbf{D}_i$, в свою очередь, может быть разбито на непересекающиеся подмножества $\mathbf{D}_{ij}$ и т.д. Разбиение множества значений данных должно осуществляться исходя из физического смысла задачи таким образом, чтобы входные взаимодействия с данными различных подмножеств $\mathbf{D}_i$ обуславливали несколько различных алгоритмы их обработки. Самой большой группой являются множества $\mathbf{M}^k$, $k \in K$ входных взаимодействий, обуславливающих выполнение цифровой системой функции k .

Математическим аналогом понятия "близости" входных взаимодействий является отношение эквивалентности [11]. Пусть имеется конечное множество Λ отношений эквивалентности λ . В частности, множество Λ обязательно включает отношения эквивалентности λ' , λ'' :

- $(\mu_1, \mu_2) \in \lambda'$ тогда и только тогда, когда $\mu_1 \in \mathbf{M}^k$ и $\mu_2 \in \mathbf{M}^k$. Именно это отношение эквивалентности позволяет выделить входные взаимодействия, обуславливающие выполнение функции k , в множестве $\mathbf{M}^k$;

- $(\mu_1, \mu_2) \in \lambda''$, где $\mu_1 \in \mathbf{M}^k$, $\mu_2 \in \mathbf{M}^k$, тогда и только тогда, когда набор данных d_1 и d_2 , присутствующих в μ_1 , μ_2 , принадлежит одной и той же подобласти $\mathbf{D}_i$ данных, где $\bigcup_{i=1}^n \mathbf{D}_i = \mathbf{D}$, $\mathbf{D}_i \cap \mathbf{D}_j = \emptyset$

при $i \neq j$, $\mathbf{D}$ — область данных для $\mathbf{M}^k$. Так, возможен случай, когда $(\mu_1, \mu_2) \in \lambda''$ тогда и только тогда, когда μ_1 и μ_2 , заданные в виде (2), отличаются в ряде событий только значениями z'_j или z''_j , соответствующими различным данным на информационных входах, обрабатываемых по одинаковому алгоритму, и изменяющими выходные последовательности цифровой системы или ее блока только в части значений на информационных выходах. Может быть задано несколько отношений эквивалентности такого типа для различных разбиений области данных $\mathbf{D}$.

В случае, когда функция k предусматривает периодический фрагмент последовательности событий, который может повторяться в различных входных взаимодействиях множества $\mathbf{M}^k$ разное число раз (например, ввод различного числа

слов информации), может быть использовано отношение эквивалентности λ''' : $(\mu_1, \mu_2) \in \lambda'''$, если μ_1 и μ_2 содержат одинаковое число периодически повторяющихся фрагментов. Могут быть заданы и другие отношения эквивалентности.

Выбор множества Λ отношений эквивалентности должен осуществляться разработчиком исходя из требуемого поведения разрабатываемой цифровой системы и физического смысла задачи. При этом, как будет ясно далее, множество Λ задается косвенно.

Каждое отношение эквивалентности λ множества Λ задается на своем множестве. Так, отношение λ' задано на всем множестве $\bar{\mathbf{M}} = \bigcup_{k \in K} \mathbf{M}^k$. На

каждом множестве $\mathbf{M}^k$, являющемся классом эквивалентности $\bar{\mathbf{M}}$ по λ' , задаются свои отношения эквивалентности типа отношения λ'' . Так, возможен случай, когда области данных для $\mathbf{M}^k$ есть $\mathbf{D} = \mathbf{D}^1 \times \mathbf{D}^2 \times \dots \times \mathbf{D}^n$, а на множестве значений $\mathbf{D}^i$, $i = 1, \dots, n$, каждого параметра входных взаимодействий из $\mathbf{M}^k$ определены свои отношения эквивалентности $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, где $\lambda_1 \in \Lambda$, $\lambda_2 \in \Lambda$, ..., $\lambda_n \in \Lambda$. Возможен и другой случай, когда отношение λ_1 оп-

ределяет разбиение $\mathbf{D} = \bigcup_{i=1}^n \mathbf{D}_i$, $\mathbf{D}_i \cap \mathbf{D}_{i'} = \emptyset$ при $i \neq i'$, а отношение λ_2 определено только на одном подмножестве или на части подмножеств $\mathbf{D}_{i_1}, \dots, \mathbf{D}_{i_l}$, где $\{i_1, \dots, i_l\} \subset \{1, \dots, n\}$.

Если на некотором множестве $\mathbf{M}^*$ (в качестве $\mathbf{M}^*$ может выступать $\bar{\mathbf{M}}$, $\mathbf{M}^k$ или класс эквивалентности $\mathbf{M}^k$ по отношению эквивалентности λ) задано отношение λ_1 , $\lambda_1 \in \Lambda$, то существует разбиение $\mathbf{M}^*$ на классы эквивалентности $\mathbf{M}^{*i}$ по отношению λ_1 . Если на некотором $\mathbf{M}^{*i}$, определено отношение λ_2 , $\lambda_2 \in \Lambda$, то для μ , где $\mu \in \mathbf{M}^{*i}$, существует произведение эквивалентностей $\lambda_1 \cdot \lambda_2$, которое всегда является эквивалентностью [131]. Произведения эквивалентностей $\prod_{\lambda_i \in \Lambda'} \lambda_i$, где $\Lambda' \subseteq \Lambda$, которые всегда являются эк-

вивалентностями, позволяют провести классификацию множества $\bar{\mathbf{M}}$ с той степенью подробности, которая необходима разработчику, определившему множество Λ . Входные взаимодействия каждого класса эквивалентности, определяемого максимально возможными произведениями $\prod_{\lambda_i \in \Lambda'} \lambda_i$, где

$\Lambda' \subseteq \Lambda$, различаются только значениями ряда t_j в соотношении (1) в пределах, не нарушающих ограничений на допустимые времена событий.

Как указывалось выше, самыми крупными классами эквивалентности на множестве $\bar{\mathbf{M}}$ являются множества $\mathbf{M}^k$, соответствующие выделению алфавита выполняемых функций $\mathbf{K}$.

Проиллюстрируем вышесказанное на примере цифровой системы управления несложным чертежным автоматом. Приведем его краткое функциональное описание. Чертежный автомат включает плоский планшет, на котором осуществляется вычерчивание, два шаговых двигателя, управляющие движением головки, в держатели которой устанавливается два пера. Головка может перемещаться параллельно плоскости планшета в поднятом положении или с одним опущенным пером (собственно вычерчивание). Имеются концевые выключатели, которые выдают некоторый сигнал при достижении каким-либо пером крайнего положения. Предусмотрены также кнопки "Ввод" и "Стоп", нажимаемые оператором в начале сеанса вычерчивания и при необходимости его остановки, и кнопки "П1", "П2" ("Перо 1" и "Перо 2"), "↑", "↓", "→", "←" для ручного опускания и перемещения вычерчивающих головок, кнопка "—" —, при нажатии которой вычерчивается пунктирная линия. Предусмотрена также клавиатура, на которой набирается расстояние между установленными в головке перьями по двум координатам. Имеется также цифровая система управления, которая после нажатия кнопки "Ввод" получает команды от компьютера, выдает последовательности сигналов на шаговые двигатели и осуществляет подъем и опускание перьев. Компьютер по каналу связи передает на устройство управления чертежным автоматом последовательность кадров, которые описывают выполняемый чертеж. Каждый кадр является командой для перемещения одной из вычерчивающих головок в опущенном или поднятом положениях по отрезку прямой или дуге окружности. При перемещении в опущенном положении головка осуществляет вычерчивание сплошной, пунктирной или штрихпунктирной линии. Система управления должна также реагировать на сигналы концевых выключателей и нажатия управляющих кнопок.

Так, для цифровой системы управления чертежным автоматом функциями являются ввод и обработка кадра, движение пера при нажатии одной из кнопок ручного управления вверх, вниз, влево или вправо.

Для функции ввода и обработки кадра классами эквивалентности по некоторому λ_1 могут являться входные взаимодействия, задающие вычерчивание дуг и прямых, классами эквивалентности по λ_2 — входные взаимодействия, задающие сплошную, пунктирную или штрихпунктирную линию. На классе эквивалентности входных взаимодействий, задающих вычерчивание прямых, задается отношение λ_3 , определяющее подклассы эквивалентности горизонтальных, вертикальных и наклонных отрезков.

Составление набора отладочных тестов

Набор отладочных тестов должен проверять как возможность выполнения одной функции после другой, если такая последовательность является допустимой, так и правильность выполнения са-

мых функций. При этом правильность выполнения самих функций является основой.

Совершенно ясно, что большее число отладочных тестов позволяет говорить о правильной работе отлаживаемой системы с большей уверенностью. В связи с тем, что большее число отлаживаемых тестов повышает трудоемкость и временные затраты на отладку, необходимо, чтобы при увеличении числа тестовых примеров все они были наиболее информативными.

Как указывалось выше, для входных взаимодействий, вызывающих выполнение одной функции, определено множество Λ отношений эквивалентности. Каждому λ_i , где $\lambda_i \in \Lambda$, поставим в соответствие признак $\mathcal{L}_i$ — переменную с конечным множеством значений $\mathbf{Z}_i^*$. Каждое значение z_i^* , $z_i^* \in \mathbf{Z}_i^*$, признака $\mathcal{L}_i$ указывает на принадлежность μ , $\mu \in \mathbf{M}$, j -му классу эквивалентности входных взаимодействий по λ_i .

Так, для цифровой системы управления чертежным автоматом значениями одного из признаков $\mathcal{L}_i$ является вид вычерчиваемого кадра: отрезок прямой или дуга окружности, значениями другого признака $\mathcal{L}_i$ — тип линии: сплошная, пунктирная или штрихпунктирная. Разработчик задает не множество эквивалентностей Λ , а набор признаков $\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2, \dots, \mathcal{L}_n$ и алфавиты их значений. Множество значений признака $\mathcal{L}_1$ всегда есть $\mathbf{K}$. Признак $\mathcal{L}_1$ определяет разбиение $\mathbf{M}$ на $\mathbf{M}^k$.

Сформулируем задачу составления набора отладочных тестов для проверки отдельных функций формально. Пусть имеется конечное множество признаков $\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2, \dots, \mathcal{L}_n$, каждый из которых может принимать конечное множество значений $\mathbf{Z}_1^*, \mathbf{Z}_2^*, \dots, \mathbf{Z}_n^*$. Пусть признаки $\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2, \dots, \mathcal{L}_n$ упорядочены таким образом, что для каждого $\mathcal{L}_l$, $l = 2, \dots, n$, существует один и только один признак $\mathcal{L}_i$, $i < l$, такой, что значение $\mathcal{L}_l$ для входного взаимодействия μ определено в том и только в том случае, если признак $\mathcal{L}_i$ для μ

имеет значение $z_i^{j_i}$, $z_i^{j_i} \in \mathbf{Z}_i^*$. Тогда взаимосвязь признаков можно представить двудольным графом $G(v, \varepsilon)$ (см. рисунок). Множество вершин этого графа есть $V = \{\mathcal{L}_1, \dots, \mathcal{L}_n\} \cup \left\{ \bigcup_{i=1}^n \mathbf{Z}_i^* \right\}$. Одна группа вершин представляет множество признаков, а другая группа — возможные значения каждого признака. Множество ребер $\varepsilon = \varepsilon^1 \cup \varepsilon^2$, $\varepsilon^1 \cap \varepsilon^2 = \emptyset$. Ребра множества ε^1 соединяют вершину $\mathcal{L}_i$ с вершиной z , если $z \in \mathbf{Z}_i^*$ (на рисунке — сплошные линии). Ребра множества ε^2 соединяют вершину z_i^j , где $z_i^j \in \mathbf{Z}_i^*$, с вершиной $\mathcal{L}_l$, если признак $\mathcal{L}_l$ определен для входного взаимодействия μ в том случае, если для этого входного взаимодействия $\mathcal{L}_i = z_i^j$ (на рисунке — штриховые линии).

Пусть множество отладочных тестов считается полным, если для любого признака $\mathcal{L}_i$, $i = 1, \dots, n$, и $z \in \mathbf{Z}_i^*$ в множестве отладочных тестов найдется по крайней мере одно входное взаимодействие, для которого $\mathcal{L}_i = z$. Минимальным полным множеством отладочных тестов назовем такое полное множество тестов, число тестов в котором минимально. Задача составления минимального полного множества отладочных тестов состоит в выборе сочетаний значений признаков для каждого отладочного теста множества.

Алгоритм формирования минимального множества отладочных тестов

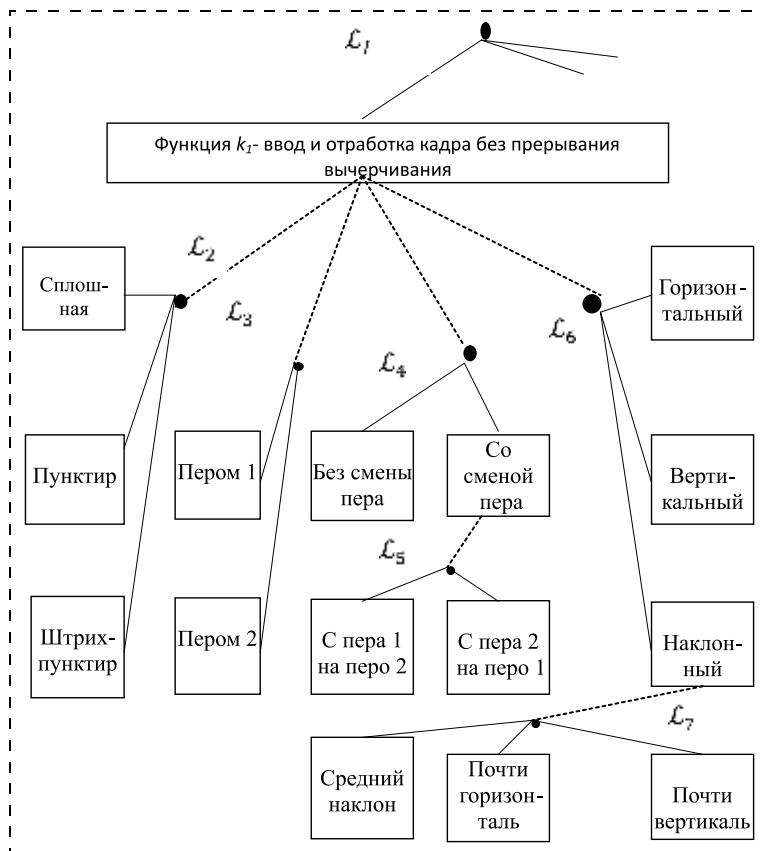
1. Присвоим ранги вершинам $\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2, \dots, \mathcal{L}_n$, равные числу ребер из множества $\mathfrak{E}^2$, входящих в путь от $\mathcal{L}_1$ до $\mathcal{L}_i$. Вершина $\mathcal{L}_1$ имеет ранг 0. Поскольку в $\mathcal{G}^{\mathcal{L}}(\mathbf{v}, \mathfrak{E})$ каждая вершина достижима из вершины $\mathcal{L}_1$, то все вершины $\mathcal{L}_1, \dots, \mathcal{L}_n$ имеют ранг, причем ранг 0 имеет только одна вершина $\mathcal{L}_1$.

2. Среди вершин множества $\{\mathcal{L}_1, \dots, \mathcal{L}_n\}$, имеющих максимальный ранг, выделим вершину $\mathcal{L}_{i_1}$, такую что $|\mathbf{Z}_{i_1}^*|$ максимально.

Рассмотрим подграф $\mathcal{G}_{i_1}$ графа $\mathcal{G}(\mathbf{v}, \mathfrak{E})$, который включает вершину $\mathcal{L}_{i_1}$, вершины z_{i_1} ,

$z_{i_1} \in \mathbf{Z}_{i_1}^*$, вершину z_l , $z_l \in \mathbf{Z}_l^*$, связанную с вершиной $\mathcal{L}_{i_1}$ ребром из множества $\mathfrak{E}^2$, вершины $\mathcal{L}_{i_2}, \dots, \mathcal{L}_{i_m}$, связанные с вершиной z_l ребрами из множества $\mathfrak{E}^2$ (если такие вершины имеются), вершины z , где $z \in \mathbf{Z}_{i_2}^*$ или $z \in \mathbf{Z}_{i_3}^* \dots$ или $z \in \mathbf{Z}_{i_n}^*$, а также ребра, соединяющие перечисленные вершины. Все вошедшие в подграф $\mathcal{G}_{i_1}$ вершины из множества $\{\mathcal{L}_1, \dots, \mathcal{L}_n\}$ имеют максимальный ранг.

Подграфу $\mathcal{G}_{i_1}$ поставим в соответствие $|\mathbf{Z}_{i_1}^*|$ наборов значений признаков $(z_{i_1}, z_{i_2}, \dots, z_{i_m})$, $z_{i_1} \in \mathbf{Z}_{i_1}^*$, $z_{i_2} \in \mathbf{Z}_{i_2}^*, \dots, z_{i_m} \in \mathbf{Z}_{i_m}^*$. Признак $\mathcal{L}_{i_1}$ в первом наборе имеет значение $z_{i_1}^1$, во втором наборе $z_{i_1}^2$ и так далее. В последнем наборе признак $\mathcal{L}_{i_1}$ имеет значение $z_{i_1}^k$, где $k = |\mathbf{Z}_{i_1}^*|$. Признаки $\mathcal{L}_{i_s}$, $s = 2, \dots, m$, в первом наборе имеют значения $z_{i_s}^1$, и в каждом последующем $z_{i_s}^{(p+1)}$, где p — номер значения признака $\mathcal{L}_{i_1}$ в предыдущем наборе.



Часть графа $\mathcal{G}(\mathbf{v}, \mathfrak{E})$ для цифровой системы управления чертежным автоматом (для наглядности учтено вычерчивание только отрезков прямых)

В случае, если подграф $\mathcal{G}_{i_1}$ содержит только одну вершину из множества $\{\mathcal{L}_1, \dots, \mathcal{L}_n\}$, а именно $\mathcal{L}_{i_s}$, наборы значений признаков суть $(z_{i_1}^1), (z_{i_1}^2), \dots, (z_{i_1}^k)$.

Удалим из графа $\mathcal{G}(\mathbf{v}, \mathfrak{E})$ подграф $\mathcal{G}_{i_1}$ и ребро из множества $\mathfrak{E}^1$, связывающее вершины z_l и $\mathcal{L}_l$. Добавим в полученный граф $|\mathbf{Z}_{i_1}^*|$ вершин, помеченных наборами значений признаков $(z_{i_1}, z_{i_1}, z_{i_2}, \dots, z_{i_m})$, $z_l \in \mathbf{Z}_l^*$, причем для всех $|\mathbf{Z}_{i_1}^*|$ вершин значение z_{i_1} одинаково, а поднаборы $(z_{i_1}, z_{i_2}, \dots, z_{i_m})$ равны наборам значений признаков, соответствующих подграфу $\mathcal{G}_{i_1}$. Соединим добавленные вершины с вершиной $\mathcal{L}_l$, полученные ребра отнесем к множеству $\mathfrak{E}^1$. Полученный граф примем за $\mathcal{G}(\mathbf{v}, \mathfrak{E})$.

3. Если $\mathcal{L}_l$ не есть $\mathcal{L}_1$, то повторим пункт 2. Если $\mathcal{L}_l$ есть $\mathcal{L}_1$, то полученное множество наборов значений признаков представляет отладочные тесты минимального полного множества.

Анализ предложенного алгоритма

Покажем, что приведенный выше алгоритм всегда сходится, а полученное множество наборов

значений признаков есть минимальное полное множество отладочных тестов.

Каждое выполнение шага 2 алгоритма уменьшает число вершин множества $\{L_1, \dots, L_n\}$ в графе $G(v, \epsilon)$. Следовательно, после конечного числа выполнения шага 2 граф $G(v, \epsilon)$ будет содержать только одну вершину из множества $\{L_1, \dots, L_n\}$, а именно вершину L_1 , что является признаком окончания работы.

Для каждого подграфа G_i , выделяемого на шаге 2, наборы значений признаков будут содержать все возможные значения признаков $L_{i_1}, \dots, L_{i_m}$, вошедших в подграф G_i . Все наборы значений признаков подграфа G_i сохраняются в новом графе $G(v, \epsilon)$. Следовательно, для всех признаков полученные наборы будут содержать все значения, т. е. полученное множество наборов значений признаков будет полным множеством отладочных тестов.

Для каждого подграфа G_i , выделяемого на шаге 2, полученное множество наборов признаков минимально и содержит $\max |Z_{i_k}^*|$, $k = 1, \dots, m$, наборов. Эти наборы признаков могут войти в множество окончательных наборов только в сочетании со значением z_l признака L_l , т. е. значение z_l признака должно встречаться в полном множестве отладочных тестов не менее $\max |Z_{i_k}^*|$, $k = 1, \dots, m$, раз. Следовательно, полученное в результате работы алгоритма множество отладочных тестов будет минимальным.

Пример минимального полного множества отладочных тестов, соответствующего рисунку, приведен в таблице.

Минимальная мощность минимального полного множества отладочных тестов есть $\max |Z_i^*|$, $i = 1, \dots, n$, где n — число признаков $L_1, \dots, L_n$; максимальная мощность минимального полного множества отладочных тестов есть $\sum_{i=1}^n (|Z_i^*| - 1) + 1$. По-

кажем это.

Минимальное полное множество отладочных тестов не может содержать менее чем $\max |Z_i^*|$, $i = 1, \dots, n$, тестов, так как в связи с нашим предположением для каждого признака множества $\{L_1, \dots, L_n\}$,

Минимальное полное множество отладочных тестов для проверки функции K_1 -ввода и отработки кадра без прерывания вычерчивания

Номер набора значений признаков	Описание
1	Сплошной горизонтальный отрезок, вычерчиваемый пером 1 без смены пера
2	Пунктирный вертикальный отрезок, вычерчиваемый со сменой пера с 1-го на 2-е
3	Штрихпунктирный отрезок среднего наклона, вычерчиваемый со сменой пера со 2-го на 1-е
4	Сплошной, почти горизонтальный отрезок, вычерчиваемый пером 1 без смены пера
5	Пунктирный, почти вертикальный отрезок, вычерчиваемый со сменой пера с 1-го на 2-е

в том числе для L_i , для которого $|Z_i^*|$ максимально, полное множество тестов должно содержать все возможные значения из Z_i^* .

Минимальное полное множество будет содержать $\max |Z_i^*|$, $i = 1, \dots, n$, отладочных тестов в том случае, когда в графе $G(v, \epsilon)$ все вершины $L_2, \dots, L_n$ будут непосредственно связаны с L_1 ребрами подмножества ϵ^2 .

При наличии только одного признака L_1 минимальное полное множество отладочных тестов содержит $|Z_1^*|$ тестов, при двух признаках L_1, L_2 — $(|Z_1^*| + |Z_2^*| - 1)$ тестов, при трех признаках L_1, L_2, L_3 — не более $(|Z_1^*| + |Z_2^*| - 1 + |Z_3^*| - 1)$ тестов и т.д. Таким образом, максимальная мощность минимального полного множества отладочных тестов

равна $\sum_{i=1}^n (|Z_i^*| - 1) + 1$. Минимальное полное мно-

жество отладочных тестов содержит $\sum_{i=1}^n (|Z_i^*| - 1) + 1$

тестов в том случае, если в графе $G(v, \epsilon)$ каждой вершине z , где $z \in Z_i^*$, $i = 1, \dots, n$, инцидентно не более одного ребра из множества ϵ^2 .

Заключение

Предлагаемый алгоритм обеспечивает формирование минимального множества отладочных тестов на основе заданного разработчиком перечня отношений эквивалентности на множестве входных взаимодействий. Другими словами, разработчик выбирает разделение каждой функции, выполняемой цифровой системой управления, на подфункции исходя из физического смысла. Безусловно, при этом присутствует некоторой субъективный фактор. При иерархическом разделении функций на подфункции разработчик в какой-то мере ориентируется на свое понимание о том, как данная подфункция реализуется в цифровой системе управления. Тем не менее, выбор тестовых примеров для отладки проектов цифровых систем управления объектами на основе проверки выполняемых функций является весьма эффективным.

Список литературы

1. Кашеев Н. И., Пономарев Д. М., Подъяблонский Ф. М. Построение тестов цифровых схем с использованием обобщенной модели неисправностей и непрерывного подхода к моделированию // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 3 (2). С. 72–77.
2. Cruz A. M., Fernandez R. B., Lozano H. M., Ramirez Salinas M. A., Vila Vargas L. A. Automated Functional Test Generation for Digital Systems Through a Compact Binary Differential Evolution Algorithm // Journal of Electronic Testing-Theory and Applications. 2015. Vol. 31, N. 4. P. 361–380.
3. Зеленко Г. В., Иванников А. Д., Рошин А. В., Стемпковский А. Л. Алгебраические модели декомпозиции задачи отладки проектов цифровых систем с помощью моделирования //

Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2016. № 3. С. 232—239.

4. **Стемпковский А. Л., Гаврилов С. В., Глебов А. Л.** Методы логического и логико-временного анализа цифровых КМОП СБИС. М.: Наука, 2007. 220 с.

5. **Jasnetski A., Oyeniran S. A., Tsertoy A.** High-Level Modeling and Testing of Multiple Control Faults in Digital Systems // IEEE 19th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS). 2016. Paper # 7482445.

6. **Березкин А. В., Федотов А. А., Филиппов А. С.** Тестирование цифровых систем, заданных высокоуровневыми спецификациями // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2011. Т. 6-1, № 138. С. 62—70.

7. **Jain S., Govani P., Podda K. B., La A. K., Parmar R. M.** Functional verification of DSP based on-board VLSI design //

International Conference on VLSI Systems, Architectures, Technology and Applications (VLSI-SATA). 2016. P. 1—4.

8. **Ubar R., Oyeniran S. A.** Multiple control fault testing in digital systems with high-level decision diagrams // 20th IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR). 2016. Paper # 7501287.

9. **Иванников В. П., Камкин А. С., Косачев А. С., Кулямин В. В., Петренко А. К.** Использование контрактных спецификаций для представления требований и функционального тестирования моделей аппаратуры // Программирование. 2007. Т. 33, № 5. С. 47—62.

10. **Иванников А. Д., Стемпковский А. Л.** Формализация задачи отладки проектов цифровых систем // Информационные технологии. 2014. № 9. С. 3—10.

11. **Мальцев А. И.** Алгебраические системы. М.: Наука. 1970. 392 с.

Debugging Input Set Generation for Testing of Control Digital Systems Functions

A. D. Ivannikov, adi@ippm.ru, Institute for Design Problems in Microelectronics
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 124365, Russian Federation

Corresponding author: **Ivannikov Aleksandr D.**, D. Sc., Deputy Director,
Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, 124365, Russian Federation, e-mail: adi@ippm.ru

Accepted on September 04, 2017

Digital control systems are considered, the functioning of which can be represented as a sequence of functions from a finite alphabet. For such systems projects debugging by simulation it is necessary to generate the minimal complete, in the sense of a particular criteria, set of tests for the applying on the simulated system to verify that it is functioning correctly. Digital control systems are modeled on the logic level of the signals they exchange with the external environment, including controlled object. As input data for the simulation input interactions are used, comprising both the actual input signals and output control of exchange signals. Algorithm of the minimum complete test set generation for project debugging is proposed, the algorithm is based on developer-defined classes of equivalence of input interactions. A designer chooses the set of attributes for digital system functions, the set has a hierarchical structure. Mathematically it is the definition of equivalence relation set for the set of input interactions. All input interactions causing the same digital system function fulfillment have equivalence relation. Attributes of input interaction subsets are the markers of equivalence relations. Hierarchical structure of equivalence relations is representing by bipartite graph. The full minimal test set generation is made by processing this bipartite graph and includes all possible functions checking.

Keywords: debugging by simulation, digital system logical simulation, debugging tests

For citation:

Ivannikov A. D. Debugging Input Set Generation for Testing of Control Digital Systems Functions, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 795—801.

DOI: 10.17587/mau.18.795-801

References

1. **Kashev N. I., Ponomarev D. M., Podyablonsky F. M.** *Pos-troenie testov cifrovih chem s ispolzovaniem obobshchennoy modeli neispravnostei i neprerivnogo podhoda k modelirovaniu* (Digital circuits tests generation based on generalized malfunction model and continuous simulation approach), *Vestnik Nijegorodskogo Universiteta*, 2011, no. 3 (2), pp. 72—77 (in Russian).

2. **Cruz A. M., Fernandez R. B., Lozano H. M., Ramirez Salinas M. A., Vila Vargas L. A.** Automated Functional Test Generation for Digital Systems Through a Compact Binary Differential Evolution Algorithm, *Journal of Electronic Testing-Theory and Applications*, 2015, vol. 31, no. 4, pp. 361—380.

3. **Zelenko G. V., Ivannikov A. D., Roshin A. V., Stempkovsky A. L.** *Algebraicheskie modeli dekompozicii zadachi otladki proektov cifrovih sistem s pomoshhu modelirovaniya* (Algebraic models for digital system design debugging by simulation), *Problemi razrabotki perspektivnih mikro- i nanoelektronnih sistem*, 2016, no. 3, pp. 232—239 (in Russian).

4. **Stempkovsky A. L., Gavrilov S. V., Glebov A. L.** *Metodi logicheskogo i logiko-vremennogo analiza cifrovih KMOP SBIS* (Logical and logical-timing methods of digital CMOS VLSI analysis), Moscow, Nauka, 2007, 220 p. (in Russian).

5. **Jasnetski A., Oyeniran S. A., Tsertoy A.** High-Level Modeling and Testing of Multiple Control Faults in Digital Systems, *IEEE 19th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS)*, 2016, Paper # 7482445.

6. **Bereskin A. V., Fedotov A. A., Filippov A. S.** *Testirovanie cifrovih sistem, zadannih visokourovnevimi specificaciyami* (Testing of digital systems defined by high level specifications), *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie*, 2011, vol. 6-1, no. 138, pp. 62—70 (in Russian).

7. **Jain S., Govani P., Poddar K. B., Lal A. K., Parmar R. M.** Functional verification of DSP based on-board VLSI design, *International Conference on VLSI Systems, Architectures, Technology and Applications (VLSI-SATA)*, 2016, pp. 1—4.

8. **Ubar R., Oyeniran S. A.** Multiple control fault testing in digital systems with high-level decision diagrams, *20th IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)*, 2016, Paper # 7501287.

9. **Ivannikov V. P., Kamkin A. S., Kulyamin V. V., Petrenko A. K.** *Ispolzovanie kontraktnih specificacij dlya predstavleniya trebovanij i funkcionalnogo testirovaniya modelei apparatury* (Contract specifications usage for requirement presentation and functional testing of equipment models), *Programmirovaniye*, 2007, vol. 33, no. 5, pp. 47—62 (in Russian).

10. **Ivannikov A. D., Stempkovsky A. L.** *Formalizatsiya zadachi otladki proektov cifrovih sistem* (Formal model of digital system design debugging task) *Informacionnie Tekhnologii*, 2014, no. 9, pp. 3—10 (in Russian).

11. **Maltcev A. I.** *Algebraicheskie sistemi* (Algebraic systems), Moscow, Nauka, 1970, 392 p. (in Russian).

В. М. Лохин, д-р техн. наук, проф., cpd@mirea.ru, **С. В. Манько**, д-р техн. наук, проф., cpd@mirea.ru,
С. А. Карпов, аспирант, cpd@mirea.ru, **И. Д. Марголин**, аспирант, cpd@mirea.ru,
Московский технологический университет, Москва

Поведенческие механизмы обеспечения сетевой связи в мультиагентных робототехнических системах

Обсуждается совокупность задач обеспечения информационного взаимодействия автономных роботов, функционирующих в составе объединенных группировок. Показана перспективность использования технологии построения mesh-сетей для организации беспроводной связи в мультиагентных робототехнических системах. Обсуждаются модели и алгоритмы планирования целесообразных действий и управления движением робототехнической группировки с учетом поддержания связности между агентами.

Ключевые слова: мультиагентная робототехническая система, групповое управление, технологии беспроводной сетевой связи, обеспечение связности

Введение

Создание мультиагентных систем, объединяющих в своем составе группу полуавтоматических или автономных роботов для совместного выполнения требуемых задач, открывает широкие перспективы для развития различных прикладных областей.

Обеспечение координированных взаимодействий автономных роботов в процессе их групповой работы сопряжено с решением целого ряда специфических задач, связанных с планированием заданий и распределением ресурсов, обобщением разнородной сенсорной информации от многочисленных источников, формированием единой модели внешнего мира, прогнозированием событий и возможных изменений обстановки. При этом ключевым аспектом, определяющим работоспособность и эффективность функционирования мультиагентной робототехнической группировки, является поддержка внутрисистемной связи.

Сложность и многогранность этого вопроса обусловлена необходимостью разработки не только собственно технических средств беспроводной сетевой связи в составе мультиагентных робототехнических систем (МАРС), но и поведенческих механизмов поддержания каналов информационного обмена при совместном движении роботов в априори заданную зону или при выходе одного из них за пределы области покрытия приемопередающих средств прочих членов группировки.

Настоящая статья, которая продолжает цикл авторских публикаций по проблемам группового управления автономными роботами [1–7], посвящена обсуждению особенностей и путей обеспечения беспроводной сетевой связи в составе МАРС.

В ней раскрываются возможности и перспективы создания систем беспроводной связи для мультиагентных робототехнических группировок на основе технологии построения mesh-сетей, когда

каждый из абонентов может выступать в роли ретранслятора.

Дается обоснование важности и актуальности задач поддержания связности, сохранение которой в пределах группировки предполагает нахождение каждого из агентов в зоне действия приемопередающих средств хотя бы одного из остальных. Рассматриваются алгоритмы контроля потери связности. В двух различных постановках обсуждается задача поддержания связи в составе МАРС. В одном случае на основе использования аппарата теории конечных автоматов разрабатываются модели и алгоритмы планирования целесообразных действий по установке робота-ретранслятора для восстановления связи между агентами при выходе одного из них за пределы области покрытия приемопередающих средств остальных членов группировки. В другом случае управление целенаправленным движением МАРС с учетом выполнения условий поддержания связи предлагается осуществлять на основе комплексного применения метода потенциальных полей и алгоритма "А-стар". Приводятся результаты компьютерного моделирования и натурных экспериментов, подтверждающие эффективность разработанных алгоритмов.

Проблемы и перспективы организации связи в мультиагентных робототехнических системах на основе современных сетевых технологий

Обеспечение единства информационного пространства является одним из важнейших принципов построения систем группового управления роботами. Его практическое воплощение предполагает, что совместное функционирование робототехнических агентов должно осуществляться за счет организации взаимного обмена всей совокупностью необходимой информации с использованием единого стандарта команд и форматов передачи данных на основе комплексного применения

современных технологий беспроводного сетевого взаимодействия [2]. Специфика подобной постановки определяется сложностью и многообразием соответствующей проблематики (рис. 1), охватывающей три ключевых направления:

- организация мобильной связи на основе современных сетевых технологий с учетом особенностей построения и функционирования МАРС;
- аутентификация робототехнических агентов и защита передаваемой информации;
- поддержание связности робототехнических агентов на уровне управления их целесообразным поведением.

В данном контексте первостепенное значение приобретает анализ современных технологий беспроводной сетевой связи, возможность использования которых в составе МАРС определяется такими характеристиками, как топология сети, дальность действия приемопередающих средств, скорость передачи информации, число поддерживаемых абонентов, механизмы маршрутизации, надежность и помехоустойчивость, и рядом других.

С точки зрения топологии сети обеспечение информационного взаимодействия между агентами в МАРС может быть построено по одному из трех возможных вариантов: централизованному, децентрализованному или смешанному. Эти три варианта отражают логическую структуру взаимодействия в системе, при этом физическая топология сети может быть различной и не обязательно должна совпадать с логической структурой.

Дальность действия беспроводной сети определяется, с одной стороны, характеристиками канала передачи, связывающего двух абонентов в прямой видимости, а с другой стороны, возможностями топологии и средств маршрутизации, определяющими географическую протяженность сети.

Беспроводные сети по дальности действия принято разделять на персональные, локальные, региональные и глобальные [8].

В подавляющем большинстве случаев совместное функционирование роботов в составе группировки при выполнении общей прикладной задачи осуществляется в общей рабочей зоне на относительно небольшой удаленности друг от друга. Это позволяет ограничить круг рассматриваемых альтернатив использованием технологий персональных и локальных сетей. Основные характеристики наиболее распространенных беспроводных технологий локальных и персональных сетей приведены в табл. 1.

Ряд беспроводных технологий, в первую очередь технологии сотовой связи GSM, CDMA и их современные расширения 3G, 4G, позволяет обеспечить высокую пропускную способность каналов связи с мобильными объектами, вплоть до возможности передачи видеоизображений в реальном масштабе времени. Однако эти технологии предполагают использование достаточно сложного оборудования, обеспечивающего централизованное управление системой мобильной связи на основе стационарных базовых станций связи.



Рис. 1. Ключевые проблемы обеспечения единства информационного пространства в составе МАРС

Таблица 1

Характеристики беспроводных технологий локальных и персональных сетей

Технология	Частотный диапазон	Пропускная способность	Радиус действия в прямой видимости
Wi-Fi 802.11g	2,4 ГГц	108 Мбит/с	100 м
Wi-Fi 802.11n	2,4/5,0 ГГц	600 Мбит/с	100 м
WiMax 802.16e	2,3—3,6 ГГц	40 Мбит/с	5 км
Bluetooth v. 1.3	2,4 ГГц	55 Мбит/с	100 м
UWB 802.15.3a	7,5 ГГц	480 Мбит/с	10 м
ZigBee 802.15.4	2,4 ГГц/915 МГц	250 Кбит/с	100 м
Wireless USB	3,1—10,6 ГГц	480 Мбит/с	10 м

В то же время, бортовые вычислительные средства автономных роботов, объединяемых в составе мультиагентных группировок, обладают достаточными ресурсами для решения задач внутрисистемного обмена необходимой информацией, включая подготовку и обработку соответствующих пакетов метаданных, которые будут иметь относительно небольшие объемы (по некоторым оценкам составляющие до сотен Кбайт).

Таким образом, по своей пропускной способности технологии локальных и персональных сетей также удовлетворяют требованиям обеспечения беспроводной связи в составе МАРС. Наличие соответствующих высоко интегрированных приемопередатчиков с низким энергопотреблением предоставляет удобные возможности интеграции технологий локальных и персональных сетей связи в бортовые системы управления автономных мобильных роботов.

Следует отметить, что беспроводные технологии локальных и персональных сетей связи, которые изначально разрабатывались для стационарных абонентов, ориентированы на построение систем с топологией типа "звезда" или "множественная звезда" и обеспечивают ограниченный радиус действия в пределах прямой видимости.

Возможности расширения географического покрытия сетей данного типа связаны с введением принципов динамической маршрутизации сообщений. Соответствующие технологии так называемых mesh-сетей, где каждый абонент может высту-

пать не только в роли отправителя или получателя сообщений, но и в качестве ретранслятора, предполагают, что маршрут прохождения пакета информации должен оперативно изменяться в зависимости от состояния и взаимной удаленности отдельных узлов.

По существу, mesh-сеть строится на основе совокупности технологий сетевого, транспортного и сеансового уровней модели взаимодействия открытых систем. Таким образом, mesh-сеть может базироваться на существующих сетевых стандартах физического и канального уровней таких, например, сетевых технологий, как WiMAX, Wi-Fi или ZigBee.

В настоящее время технологии беспроводных mesh-сетей активно развиваются. Целый ряд разработок, включая MeshLogic, RittalNet, SmartMesh, находятся на стадии опытной эксплуатации, стандартизации и внедрения.

Так, например, типовая система, создаваемая по технологии MeshLogic, представляет собой одно-ранговую многоячеювую сеть, в топологии которой все устройства являются равноправными и обладают одинаковой функциональностью. Оптимальный маршрут доставки данных определяется по мере передачи пакета по сети, в том числе в обход вышедших из строя узлов. Подобное решение позволяет обеспечить устойчивость к изменениям в топологии сети и повышение надежности доставки данных. Соответствующая реализация беспроводных узлов в сети MeshLogic предполагает использование приемопередатчика WirelessUSB, но допускает его замену и другими типами приемопередатчиков устройств [9].

Анализ возможностей современных сетевых технологий показывает, что уровень их развития позволяет обеспечить создание эффективных средств и методов организации беспроводной связи в составе МАРС.

Однако надежность и эффективность систем беспроводной сетевой связи и собственно мультиагентных группировок, построенных на их основе, будет во многом определяться степенью защищенности как самих каналов передачи данных, так и проходящей по ним информации.

Следует отметить, что проблема защиты информации и информационно-управляющих систем, которая имеет крайне важное и актуальное значение для целого ряда различных прикладных областей, особенно остро начинает проявляться в сфере специальной и военной робототехники.

Известные примеры хакерских атак и несанкционированного перехвата информационно-управляющих каналов для злонамеренного вмешательства в работу полуавтоматических и автономных систем различных типов и назначения (вплоть до принудительной посадки беспилотного летательного аппарата ВВС США RQ-170 Sentinel на территории Ирана в декабре 2011 г. [10]) свидетельствуют о серьезности возникающих угроз кибербезопасности средств робототехники.

Тем не менее, результаты проводимых исследований [11, 12] подтверждают реальность перспектив создания эффективных мер комплексной защиты информационно-управляющих систем и каналов связи в составе современных образцов роботов и мультиагентных робототехнических группировок, включая, в том числе, средства и методы аутентификации, распознавания "свой-чужой" и т.д.

Особый аспект надежного обеспечения сетевой связи в составе МАРС обусловлен необходимостью развития специализированных поведенческих функций, направленных на нейтрализацию угроз потери информационного контакта на границах зоны действия приемопередатчиков средств отдельных членов группировки за счет ее реконфигурации с соответствующей расстановкой роботов-ретрансляторов.

Особый аспект надежного обеспечения сетевой связи в составе МАРС обусловлен необходимостью развития специализированных поведенческих функций, направленных на решение двух ключевых проблем:

- сохранение (или восстановление) единства информационного пространства группировки за счет ее реконфигурации с соответствующей расстановкой роботов-ретрансляторов;
- соблюдение условий поддержания единства информационного пространства робототехнической группировки в процессе ее целенаправленного перемещения.

Подобная постановка охватывает целую совокупность задач, главными из которых являются:

- контроль единства информационного сетевого пространства и своевременное определение моментов возможной потери информационных контактов между робототехническими агентами ввиду превышения допустимых значений их взаимной удаленности;
- планирование целесообразного поведения автономных роботов для выполнения общей прикладной задачи в составе мультиагентной группировки с учетом необходимых действий по расстановке ретрансляторов для поддержания каналов связи при возникновении угрозы их разрыва;
- планирование движений роботов с учетом поддержания взаимного информационного контакта для обеспечения целенаправленного перемещения мультиагентной группировки в среде с препятствиями.

Решение перечисленных задач составляет комплексную основу надежного обеспечения беспроводной сетевой связи и поддержания единства общего информационного пространства в составе МАРС.

Контроль поддержания единства информационного сетевого пространства мультиагентной робототехнической системы

Поддержание единства информационного пространства МАРС обеспечивает возможность передачи данных по каналам беспроводной сетевой связи между всеми членами группировки с уста-

новлением либо непосредственного контакта, либо опосредованного контакта друг через друга.

В каждый конкретный момент времени конфигурация группировки целиком и полностью определяется текущим местоположением автономных роботов и их взаимной удаленностью. Так, осуществление прямого двустороннего контакта для любой пары (i, j) робототехнических агентов $(i, j = 1, \dots, n$, где n — численность группировки) регламентируется тем условием, когда (как показано на рис. 2) их взаимная удаленность r_{ij} не превышает радиуса действия $r_{пп}$ приемопередающих бортовых средств, имеющих идентичные характеристики:

$$r_{ij} \leq kr_{пп}, k \leq 1. \quad (1)$$

При этом контроль выполнения условия (1) при $k = 1$ или $k < 1$ предполагает, соответственно, выявление ситуаций свершившейся или возможной потери информационного контакта между роботами.

Таким образом, становится очевидным, что одним из важнейших вопросов поддержания единства информационного пространства МАРС является контроль конфигурации группировки, анализ те-

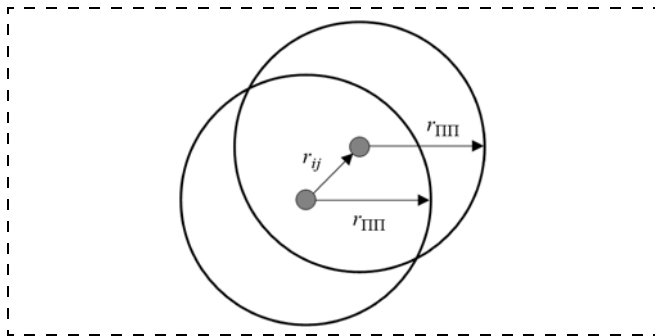


Рис. 2. Взаимное расположение робототехнических агентов в зоне покрытия приемопередающих бортовых средств с возможностью установления двусторонней связи

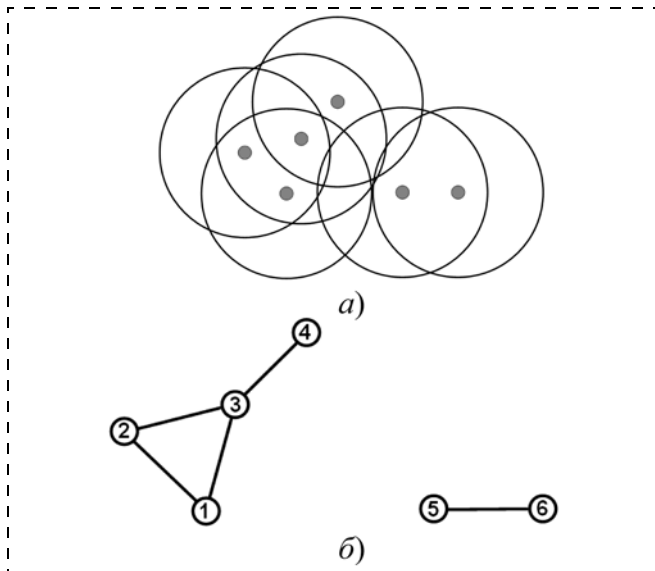


Рис. 3. Пример взаимного расположения автономных роботов в составе мультиагентной группировки (а) и соответствующая сетевая структура системы беспроводной связи (б)

кущего расположения роботов и степени перекрытия зон их приемопередающих средств.

Соответствующей моделью сетевой структуры мобильной системы беспроводной связи в составе мультиагентной группировки может служить неориентированный граф, узлами которого выступают бортовые приемопередатчики автономных роботов, а дуги отображают возможность обеспечения непосредственного информационного контакта в смысле выполнения условия (1):

$$G = (V, E), \quad (2)$$

где V — множество вершин, ассоциируемых с бортовыми приемопередатчиками автономных роботов, входящих в состав мультиагентной группировки; E — множество дуг, отражающих выполнение условий установления прямой связи между роботами.

В качестве примера на рис. 3 для некоторого варианта случайной расстановки робототехнических агентов приведена модель физической структуры сети беспроводной связи, представленной в виде графа.

В свою очередь, матрица смежности A графа G , которая однозначно описывает его структуру, может быть сформирована путем проверки выполнения условия (1) для каждого из элементов матрицы удаленности:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если выполняется условие (1);} \\ 0 & \text{— в противном случае,} \end{cases} \quad (3)$$

где $i, j = 1, \dots, n$ — число вершин графа, равное численности МАРС.

При использовании графа в качестве структурной модели сети беспроводной связи гораздо большей наглядностью и информативностью, чем матрица смежности A , обладает так называемая матрица достижимости A^* , элементы a_{ij}^* которой характеризуют наличие путей между соответствующими вершинами v_i и v_j . Так, для примера, приведенного на рис. 3, б, матрицы смежности и достижимости графа будут записываться в виде:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, A^* = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Матрица достижимости может быть получена путем n -кратной пошаговой композиции матрицы смежности с самой собой и последующим сложением результатов каждого шага [13]:

$$A^* = A \vee A^2 \vee \dots \vee A^n. \quad (5)$$

В этом случае при использовании операций логического базиса значения элементов полученной матрицы достижимости будут характеризовать наличие или отсутствие путей между соответствующими узлами графа. Вместе с тем, при использовании операций алгебраического базиса значения элементов полученной матрицы достижимости будут

характеризовать не только наличие, но и число путей между соответствующими узлами графа.

Другой подход к формированию матрицы достижимости связан с применением рекуррентного алгоритма Флойда — Уоршелла [14], имеющего кубическую сложность и обеспечивающего последовательное вычисление кратчайших путей d_{ij}^n между вершинами графа:

$$d_{ij}^k = \min(d_{ij}^{k-1}, d_{ik}^{k-1} + d_{kj}^{k-1}), \forall i, j \text{ для } k = 1, \dots, n, (6)$$

где d_{ij}^0 — длина ребра между вершинами v_i и v_j .

Матрица достижимости является наглядным отражением конфигурации графа в смысле связности его вершин. Анализ этой матрицы, проводимый путем ее построчного просмотра, позволяет обеспечить выделение так называемых компонент связности:

$$U_k = V_k(G): a_{ij}^*|^{i,j \in V_k} \neq 0. (7)$$

Под компонентой связности графа понимается такое подмножество его вершин, для любой пары которых существует путь из одной в другую. Применительно к рассматриваемой задаче компонента связности графа будет соответствовать подгруппе автономных роботов, объединенных каналами беспроводной передачи данных.

Организация периодического контроля матриц удаленности и смежности узлов графа как структурной модели конфигурации робототехнической группировки позволит обеспечить обнаружение не только возможности или самого факта нарушения единства информационного пространства, но и тех робототехнических агентов, канал передачи данных между которыми был (или будет) потерян (с точностью до значения поправочного коэффициента в условии (1)).

Планирование целесообразных действий автономных роботов в составе мультиагентной группировки с учетом поддержания сетевой связи

Контроль конфигурации МАРС позволяет обеспечить своевременное обнаружение ситуаций возможной (или свершившейся) потери связи в группе совместно функционирующих роботов, в том числе при необходимости выхода одного из них за пределы зоны общего информационного пространства. В последнем случае восстановление единства информационного пространства группировки предполагает использование кого-либо из робототехнических агентов в качестве ретранслятора, размещаемого в окрестности зоны потери связи. При этом планирование целесообразного поведения и координация действий автономных роботов в составе МАРС должны осуществляться не только исходя из условий совместного выполнения поставленной прикладной задачи, но и с учетом требований поддержания сетевой связи.

Перспективный подход к построению программно-алгоритмических средств планирования целесообразного поведения автономных роботов в составе МАРС основан на представлении модели процесса

выполнения решаемой прикладной задачи по установленному сценарию в виде сети типовых конечных автоматов, каждый из которых ставится в соответствие отдельным технологическим операциям [3, 4].

В рассматриваемом контексте типовой конечный автомат как стандартный элемент для формирования подобного рода сценарных моделей должен обеспечивать выдачу двух видов команд:

- на выполнение данной конкретной операции при поступлении сигнала об отсутствии или завершении всех предшествующих;
- на установку ретранслятора для восстановления или поддержания канала передачи данных при появлении информации о потере связи с исполнителем назначенной операции.

Конечный автомат, обладающий необходимым набором подобных свойств и предназначенный для описания технологической операции в составе сценарной модели выполнения решаемой прикладной задачи, может быть представлен в следующем виде:

$$K^O = \{U^O, X^O, Y^O, f^O, h^O\}, (8)$$

где $U^O = (u_0^O, u_1^O, u_2^O, u_3^O, u_4^O)$ — входной алфавит; u_0^O — входной сигнал о наличии невыполненных операций, предшествующих данной; u_1^O — входной сигнал об отсутствии невыполненных операций, предшествующих данной; u_2^O — входной сигнал о завершении данной конкретной операции; u_3^O — входной сигнал о возможной или свершившейся потере связи с исполнителем данной конкретной операции; u_4^O — входной сигнал о восстановлении связи с исполнителем данной конкретной операции; $X^O = (x_0^O, x_1^O, x_2^O, x_3^O)$ — алфавит состояний; x_0^O — состояние "операция не выполнена"; x_1^O — состояние "операция находится в стадии выполнения"; x_2^O — состояние "операция выполнена"; x_3^O — состояние "потеря связи с исполнителем операции"; $Y^O = (y_0^O, y_1^O, y_2^O, y_3^O)$ — выходной алфавит; y_0^O — выходной сигнал, подтверждающий, что операция находится в состоянии "не выполнена"; y_1^O — выходной сигнал, подтверждающий, что операция находится в стадии выполнения; y_2^O — выходной сигнал, подтверждающий, что операция выполнена; y_3^O — выходной сигнал, сообщающий о необходимости восстановления связи с исполнителем операции; f^O, h^O — функции переходов и выходов, задаваемые табл. 2.

Таблица 2

Входы	Состояния			
	x_0^O	x_1^O	x_2^O	x_3^O
u_0^O	x_0^O	x_1^O	x_2^O	x_3^O
u_1^O	x_1^O	x_1^O	x_2^O	x_3^O
u_2^O	x_0^O	x_2^O	x_2^O	x_3^O
u_3^O	x_0^O	x_3^O	x_2^O	x_3^O
u_4^O	x_0^O	x_1^O	x_2^O	x_1^O
Выходы	y_0^O	y_1^O	y_2^O	y_3^O

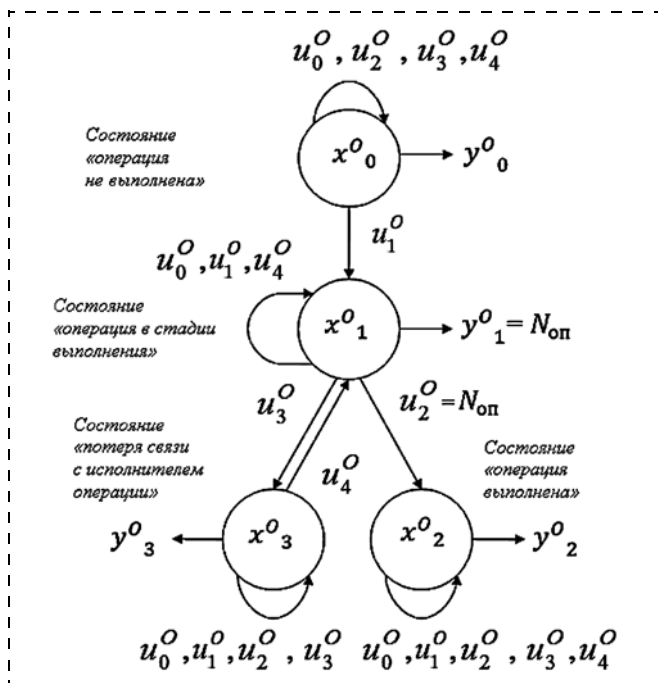


Рис. 4. Диаграмма переходов автомата, контролирующего выполнение операции в составе сценария решения поставленной прикладной задачи

Диаграмма переходов конечного автомата (9) как типового элемента модели выполнения решаемой прикладной задачи по установленному сценарию показана на рис. 4.

Модель выполнения решаемой прикладной задачи, сформированная в виде древовидной иерархической сети конечных автоматов вида (9), позволяет обеспечить не только контроль последовательно-параллельной очередности следования технологических операций в соответствии с априорно установленным сценарием, но и выдачу текущих заданий по его реализации силами имеющихся агентов с учетом необходимых действий по восстановлению сетевой связи в случае ее потери. При этом в качестве точки размещения ретранслятора может рассматриваться последнее известное местоположение робота, связь с которым была утрачена (рис. 5).

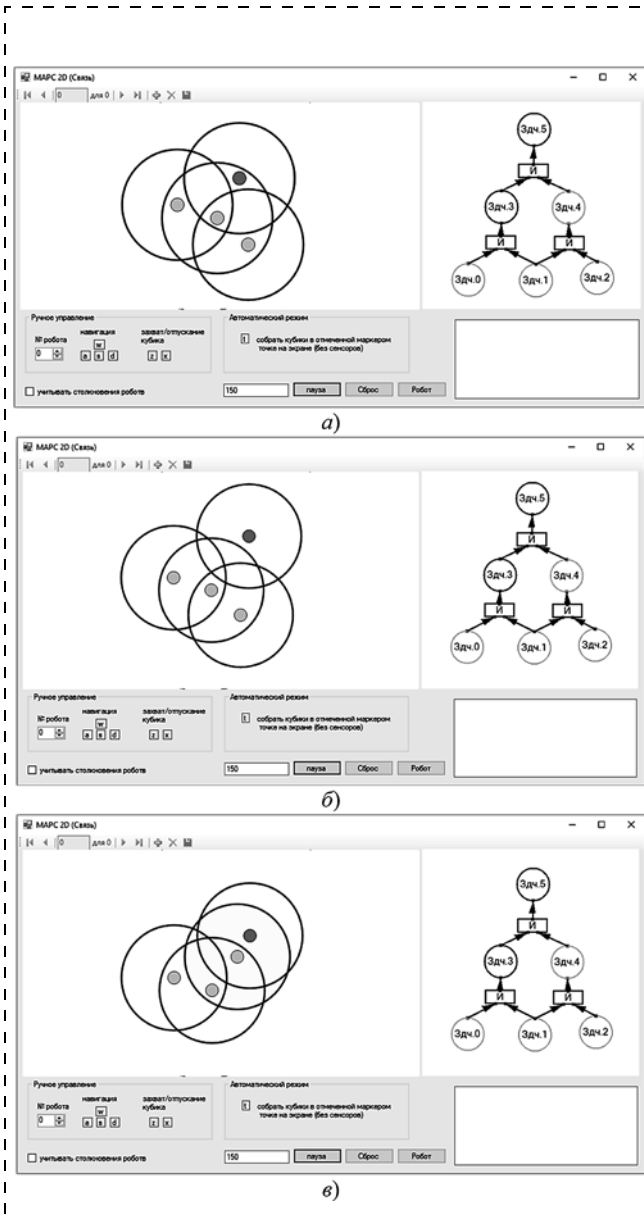


Рис. 5. Фрагменты моделирования процессов восстановления канала связи в составе MARCS при выполнении поставленной задачи согласно заданному сценарию:

а) возникновение угрозы потери связи с одним из роботов группировки; б) потеря связи; в) восстановление канала связи за счет установки робота-ретранслятора в точку потери связи

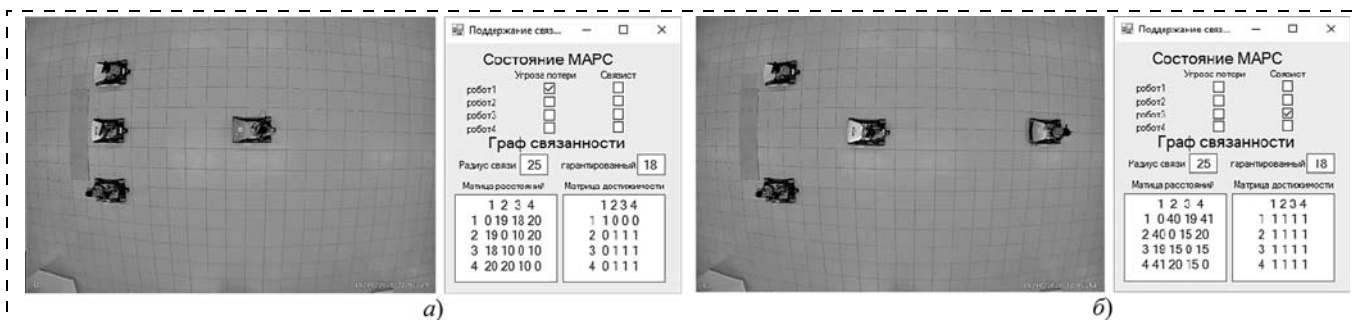


Рис. 7. Фрагменты натурных экспериментов по комплексной обработке моделей и алгоритмов планирования целесообразных действий автономных роботов в составе мультиагентной группировки с учетом поддержания сетевой связи:

а — обнаружение угрозы потери связи с одним из роботов; б — выдвижение робота-ретранслятора и восстановление канала связи в составе группировки

Экспериментальные исследования по отработке развиваемого подхода проводились как на моделях, так и на реальных образцах автономных мобильных роботов *KUKA YouBot (KUKA Roboter, Germany)*, оснащенных лазерными сканирующими дальномерами и средствами беспроводной сетевой связи (рис. 6, см. вторую сторону обложки).

Результаты компьютерного моделирования (см. рис. 5) и натурных экспериментов (рис. 7) полностью подтвердили эффективность предложенных моделей и алгоритмов, реализующих планирование и контроль целесообразных действий автономных роботов в составе мультиагентной группировки с учетом поддержания сетевой связи.

Планирование перемещений и управление движением робототехнической группировки в среде с препятствиями с учетом условий поддержания сетевой связи

Задача планирования целенаправленных перемещений автономных мобильных роботов в общем случае может рассматриваться в различных вариациях. Известные методы и алгоритмы ее решения позволяют обеспечить отыскание требуемого маршрута не только при наличии априорно известной карты с указанием особенностей рельефа, расположения препятствий и т.д., но и в условиях неопределенности рабочей обстановки.

Управление движением группы роботов (в отличие от случая с одиночным роботом) существенно осложняется рядом специфических факторов:

- ограничениями на максимальное значение взаимной удаленности отдельных роботов в целях поддержания каналов беспроводной сетевой связи в составе группировки;
- условиями предотвращения столкновений роботов друг с другом, а также с объектами внешней среды;
- требованиями по формированию и последующей отработке некоторого общего маршрута, определяющего целенаправленное перемещение робототехнической группировки в заданную область.

Нетривиальность подобной постановки обуславливает необходимость развития некоторого нового подхода к ее решению, который может быть основан на интеграции методов потенциальных полей и поиска кратчайших путей на взвешенных графах.

Одним из наиболее эффективных способов поиска кратчайших путей на взвешенных графах является алгоритм "А-стар" [15], который нашел широкое применение для автоматического построения маршрутов целенаправленного перемещения средств мобильной робототехники. Согласно этому алгоритму выбор оптимального маршрута осуществляется в ходе пошагового просмотра всех путей из начальной вершины в конечную с учетом эвристических оценок стоимости возможных альтернатив:

$$h(n) = p(n) + s(n), \quad (9)$$

где $h(n)$ — значение оценки стоимости искомого маршрута при его прохождении через вершину n ; $p(n)$ — стоимость кратчайшего пути к вершине n из точки старта; $s(n)$ — эвристическая оценка стоимости пути от вершины n к заданной целевой вершине.

Применительно к рассматриваемой задаче использование алгоритма "А-стар" обеспечивает возможность построения оптимального маршрута для целенаправленного перемещения робототехнической группировки в привязке к ее "центру масс".

В свою очередь, применение метода потенциальных полей [15, 16] позволяет обеспечить решение следующих ключевых вопросов:

- направленного движения каждого из роботов в составе группировки по отношению к виртуальной цели, перемещающейся вдоль сформированного маршрута;
- учета ограничений на максимально допустимые значения удаленности роботов по отношению друг к другу, а также к центру масс группировки в целом;
- учета ограничений на минимально допустимые значения удаленности роботов по отношению друг к другу, а также к объектам внешней среды.

Привлечение метода потенциальных полей для одновременной реализации подобного набора функций обусловлено его широкими возможностями для решения задач управления подвижными объектами различных типов и назначения.

Специфика метода связана с абстрактным представлением объекта управления, его целевого местоположения, а также элементов внешней обстановки в виде системы заряженных тел. Потенциальные поля, индуцируемые зарядами того или иного знака, обуславливают появление совокупности сил притяжения и отталкивания, которые действуют на объект и определяют направление и модуль скорости его перемещения. При этом в общем случае считается, что сила воздействия $\mathbf{f}$ каждого из заряженных тел обратно пропорциональна некоторой экспоненциальной (например, квадратичной) функции расстояния до объекта:

$$\mathbf{f} = \mathbf{e} \frac{k}{d^2}, \quad (10)$$

где $\mathbf{e}$ — единичный вектор, определяющий направление силы, действующей на объект со стороны заряженного тела; k — весовой коэффициент; d — взаимное расстояние между объектом управления и соответствующим элементом сцены, каждый из которых представлен в виде тел с зарядом определенного знака.

Таким образом, поведение отдельного робототехнического агента в составе группировки, перемещение которой должно осуществляться вдоль некоего априорно построенного маршрута, будет

формироваться под действием совокупности следующих потенциальных сил:

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^{N-1} \mathbf{f}_i^r + \sum_{j=1}^K \mathbf{f}_j^o + \mathbf{f}_g, \quad (11)$$

где $\mathbf{f}_i^r$ — воздействие i -го члена группировки на рассматриваемого робототехнического агента; $\mathbf{f}_j^o$ — сила отталкивающего воздействия на робототехнического агента со стороны j -го элемента внешней среды (выступающего в качестве препятствия); $\mathbf{f}_g$ — сила притягивающего воздействия на робототехнического агента со стороны виртуальной целевой точки g , которая перемещается вдоль маршрута, формируемого с использованием алгоритма "А-стар" и определяющего целенаправленное движение группировки.

Важно отметить, что характер (а следовательно, и направление $\mathbf{e}_i$) силы взаимодействия $\mathbf{f}_i$ между двумя роботами (притяжение или отталкивание) будет меняться в зависимости от расстояния между ними, варьирующегося по ходу движения группировки:

$$\mathbf{e}_i = \begin{cases} \frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_i}{d_i} & \text{при } d_i < d_{\min}; \\ \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}}{d_i} & \text{при } d_i > d_{\max}, \end{cases} \quad (12)$$

где $\mathbf{x}$ — вектор текущего положения рассматриваемого робототехнического агента; $\mathbf{x}_i$ — вектор текущего положения i -го члена группировки; d_i — текущее расстояние между рассматриваемым робототехническим агентом и i -м членом группировки; $d_{\min}$ — предельно допустимое минимальное расстояние между роботами, установленное для предотвращения взаимных столкновений; $d_{\max}$ — пре-

дельно допустимое максимальное расстояние между роботами, соответствующее дальности действия приемопередающих бортовых средств.

Совокупность воздействий, потенциально оказываемых на робот физическими и виртуальными элементами рабочей обстановки, позволяет определить модуль и направление требуемой скорости его перемещения. В простейшем случае скорость перемещения робота (с точностью до ее предельно допустимого значения) может пропорционально соответствовать приложенным воздействиям. В этом смысле выражения (12)—(13) представляют собой модель поведения автономных роботов, согласованное функционирование которых в составе группировки обеспечивает ее целенаправленное движение в среде с препятствиями с выполнением условий поддержания внутрисистемной сетевой связи.

При этом согласованность процессов функционирования роботов как важнейший аспект группового управления обусловлена единством используемой модели, особенности построения которой отражают специфику не только индивидуальных действий (в первую очередь на уровне механизмов предотвращения столкновений), но и коллективного поведения (на уровне механизмов слежения за "центром масс" группировки, контроля ограничений на допустимое значение взаимной удаленности, а также отработки общей целевой точки).

Экспериментальные исследования по оценке развиваемого подхода к организации группового управления роботами с учетом ограничений на их взаимную удаленность при движении в среде с препятствиями проводились на моделях и реальных образцах автономных мобильных роботов KUKA YouBot (KUKA Roboter, Germany).

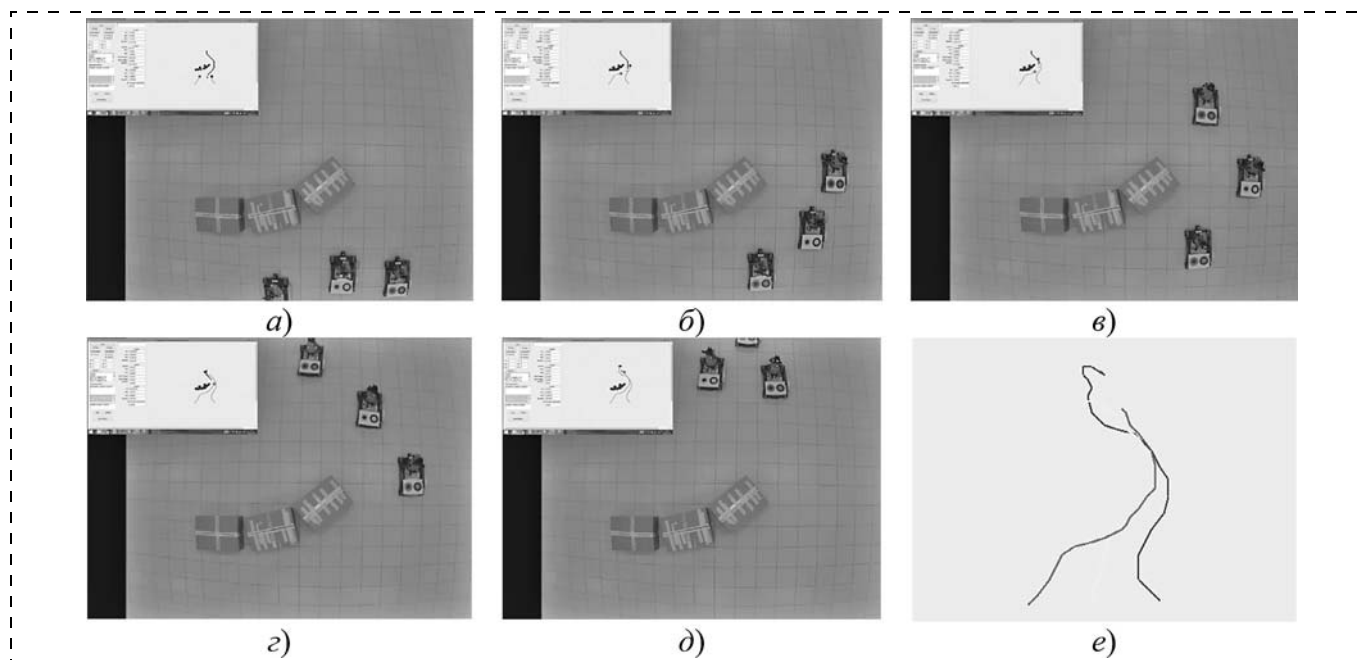


Рис. 9. Фрагменты натуральных экспериментов по комплексной отработке технологий группового управления роботами в составе мультиагентной системы: целенаправленное движение группы роботов вдоль формируемого маршрута с учетом ограничений на их взаимную удаленность (а—д); траектории движения отдельных роботов при целенаправленном перемещении мультиагентной группировки (е)

Модельная стадия экспериментов, связанная с отладкой разработанного программно-алгоритмического обеспечения, выполнялась в среде *V-REP (Virtual Robot Experimentation Platform) (Coppelia Robotics, Switzerland)*, которая является универсальным специализированным симулятором средств робототехники различных типов и назначения.

Натурные эксперименты ставили своей целью отладку аппаратно-программных средств навигации и беспроводной сетевой связи автономных роботов, действующих в составе группировки в условиях полигона МИРЭА, ориентированного на отработку технологий интеллектуального управления МАРС [17].

Полученные экспериментальные результаты (рис. 8, см. вторую сторону обложки, и рис. 9) не только доказали эффективность предложенных моделей и алгоритмов, но и на практике подтвердили целесообразность и принципиальную возможность их использования при создании интеллектуальных систем группового управления роботами.

Заключение

Перспективные образцы автономных роботов и мультиагентных систем, создаваемых на их основе, должны обладать широкими возможностями по надежному выполнению поставленных прикладных задач в условиях неопределенности внешней среды.

Реализация этих требований предполагает наличие развитого комплекта программно-алгоритмических средств бортовых систем обработки информации и управления, обеспечивающих анализ текущего состояния робота и окружающей обстановки, планирование целесообразного поведения и последовательности действий, а также их последующую отработку.

При этом многообразие возникающих задач обуславливает целесообразность привлечения различных методов и алгоритмов их решения. Так, в частности, только в данной статье рассматриваются два возможных варианта формирования поведенческих механизмов поддержания сетевой связи при управлении МАРС.

Однако следует отметить, что функциональность, автономность и адаптивность робота будет во многом определяться организационной структурой его программного обеспечения и заложенными возможностями избирательно-ситуативного подключения тех или иных алгоритмических процедур в зависимости от специфики решаемых задач, особенностей среды и рабочей обстановки, действующих факторов неопределенности и т.д.

В этом случае состав системы должен предусматривать наличие библиотеки соответствующих программно-алгоритмических управляющих процедур, а также базы знаний, регламентирующих их выбор и использование применительно к рассматриваемой ситуации.

Такой подход к созданию нового поколения систем управления автономными роботами (и другими типами подвижных объектов), который ставит

своей целью существенное повышение их адаптивных свойств на основе развития принципов интеллектуализации, не только обеспечивает гибкость и реконфигурируемость программно-алгоритмического обеспечения, но и открывает потенциальные возможности для автоматического пополнения имеющихся знаний в режиме самообучения с учетом обобщения накопленного опыта и результатов функционирования в условиях неопределенности.

Список литературы

1. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Крючков Е. Н., Кучерский Р. В., Диане С. А. Мультиагентные робототехнические системы: примеры и перспективы применения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 2. С. 22—32.
2. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Принципы построения и проблемы разработки мультиагентных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 3. С. 11—16.
3. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Крючков Е. Н., Кучерский Р. В., Худак Ю. И. Модели и алгоритмы планирования действий и распределения заданий в мультиагентных робототехнических системах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 5. С. 44—50.
4. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Диане С. А. К. Способы представления знаний и особенности функционирования мультиагентных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 1. С. 36—39.
5. Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Диане С. А. К., Трипольский П. Э., Карпов С. А. Модели и алгоритмы оценки численности состава мультиагентных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 1. С. 20—23.
6. Лохин В. М., Манько С. В., Александрова Р. И., Диане С. А. К., Панин А. С. Механизмы интеллектуальных обратных связей, обработки знаний и самообучения в системах управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими группировками // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 8. С. 545—555.
7. Лохин В. М., Манько С. В., Александрова Р. И., Романов М. П., Диане С. А. К. Принципы построения и программно-алгоритмическое обеспечение человеко-машинного интерфейса для автономных роботов и мультиагентных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 9. С. 606—614.
8. Шахнович И. В. Современные технологии беспроводной связи. М.: Техносфера, 2006.
9. Баскаков С., Оганов В. Беспроводные сенсорные сети на базе платформы MeshLogic // Электронные компоненты. 2006. № 8. С. 65—68.
10. Жуков И. Актуальные вопросы обеспечения кибербезопасности беспилотных летательных аппаратов // Радиоэлектронные технологии. 2016. № 1.
11. Рябко Б. Я., Фионов А. Н. Криптографические методы защиты информации. М.: Горячая линия — Телеком, 2012.
12. Антипов А. Л., Быковский А. Ю., Егоров А. А., Компанец И. Н. Процедура аутентификации роботизированных агентов на основе многозначной и нечеткой логики // Радиотехника. 2008. № 8. С. 97—104.
13. Белоусов А. И., Ткачев С. Б. Дискретная математика. М.: МГТУ, 2006.
14. Кормен Т. Х., Лейзерсон Ч. И., Ривест Р. Л., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. М.: Вильямс, 2006.
15. Рассел С. Дж., Норвич П. Искусственный интеллект: современный подход / Пер. с англ. и ред. К. А. Птицына. М.: Вильямс, 2006.
16. Платонов А. К., Карпов И. И., Кирильченко А. А. Метод потенциалов в задаче прокладки трассы // Препринт Ин-та прикладной математики АН СССР, 1974.
17. Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Романов А. М. Универсальная бортовая система управления роботами различных типов базирования и назначения (реализация принципов унификации и импортозамещения) // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. Т. 1. № 3. С. 235—240.

Behavioral Mechanisms Ensuring Network Communications in Multi-Agent Robotic Systems

V. M. Lokhin, cpd@mirea.ru, S. V. Man'ko, cpd@mirea.ru,
S. A. Karpov, cpd@mirea.ru, I. D. Margolin, cpd@mirea.ru,
Moscow Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation

Corresponding author: Man'ko Sergei V., D. Sc.,
Professor Moscow Technological University, Moscow,
119454, Russian Federation, e-mail: cpd@mirea.ru

Accepted on July 04, 2017

The article discusses a number of strategies intended to support and maintain informational interactions between a group of robots functioning as a collective of autonomous agents. The article demonstrates advantageousness of utilization of technology of mesh-networks building for the realization of wireless connections in multi-agent robotic systems. Also, the article substantiates importance and actuality of the connectivity maintenance, whose preservation in frames of the group asks for each of the agents to be in an area of reach of communication devices of at least one another agent of the group. An algorithm of control of the connectivity loss is proposed. Models and algorithms of planning of actions and control of the movement of the robot group taking maintenance of connectivity between agents into account are discussed. Two key problems are considered, the solution of which is necessary to ensure the reliable network inside MARS. The first task is the preservation or recovery of the unity of the information space by reconfiguring the group of robots and assigning appropriate robots to the role of repeaters. The second task is maintaining of the unity of the information space of MARS in the process of its purposeful movement. To realize the first task, we propose an algorithm for the control for loss of the connectivity maintenance. It is based on finite state machines technology enabling change of the robot group's configuration in an autonomous mode for providing the permanent presence of all agents in the area of the receiving and transmitting devices, at least for one agent in the group. To realize the second task, we propose an algorithm for maintaining a specified distance between the agents moving in a non-deterministic environment. This algorithm is based on potential field method and the A-star pathfinding algorithm.

Keywords: multi-agent robotic system, group control, wireless networking technology, group connectivity

For citation: Lokhin V. M., Man'ko S. V., Karpov S. A., Margolin I. D. Behavioral Mechanisms Ensuring Network Communications in Multi-Agent Robotic Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 802–811.

DOI: 10.17587/mau.18.802-811

References

1. Makarov I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Kryuchenkov E. N., Kucherskii R. V., Diane S. A. *Mul'tiagentnye robototekhnicheskie sistemy: primery i perspektivy primeneniya* (Multi-agent robotic systems: examples and perspectives of application), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 2, pp. 22–32 (in Russian).
2. Makarov I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P. *Principy postroeniya i problemy razrabotki mul'tiagentnykh robototekhnicheskikh sistem* (Principles of construction and problems of development of multi-agent robot systems), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 3, pp. 11–16 (in Russian).
3. Makarov I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Kryuchenkov E. N., Kucherskii R. V., Khudak Yu. I. *Modeli i algoritmy planirovaniya dejstviy i raspredeleniya zadaniy v mul'tiagentnykh robototekhnicheskikh sistemah* (Models and algorithms for action planning and task distribution in multi-agent robotic systems), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 5, pp. 44–50 (in Russian).
4. Makarov I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V., Diane S. A. K. *Sposoby predstavleniya znaniy i osobennosti funkcionirovaniya mul'tiagentnykh robototekhnicheskikh sistem* (Methods of representation of knowledge and features of the functioning of multi-agent robot systems), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 1, pp. 36–39 (in Russian).
5. Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Diane S. A. K., Tripol'skii P. E., Karpov S. A. *Modeli i algoritmy ocenki chislennosti sostava mul'tiagentnykh robototekhnicheskikh sistem* (Models and algorithms for estimating the strength of multi-agent robot systems), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 3, pp. 20–23 (in Russian).
6. Lokhin V. M., Man'ko S. V., Aleksandrova R. I., Diane S. A. K., Panin A. S. *Mekhanizmy intellektual'nykh obratnykh svyazey, obrabotki znaniy i samoobucheniya v sistemah upravleniya avtonomnymi robotami i mul'tiagentnymi robototekhnicheskimi gruppirovkami* (Mechanisms of intelligent feedback, knowledge processing and self-learning in control systems of autonomous robots and multi-agent robotic groups), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 545–555 (in Russian).

7. Lokhin V. M., Man'ko S. V., Aleksandrova R. I., Romanov M. P., Diane S. A. K. *Principy postroeniya i programmno-algoritmicheskoe obespechenie cheloveko-mashinnogo interfejsa dlya avtonomnykh robotov i mul'tiagentnykh robototekhnicheskikh sistem* (Principles of construction and software-algorithmic support of the human-machine interface for autonomous robots and multi-agent robot systems), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, no. 9, vol. 17, pp. 606–614 (in Russian).
8. Shakhnovich I. V. *Sovremennyye tekhnologii besprovodnoy svyazi* (Modern wireless technologies), Moscow, Tekhnosfera, 2006 (in Russian).
9. Baskakov S., Oganov V. *Besprovodnye sensornye seti na baze platformy MeshLogic* (Wireless sensor networks based on the Mesh-Logic platform), *Elektronnyye komponenty*, 2006, no. 8, pp. 65–68 (in Russian).
10. Zhukov I. *Aktual'nye voprosy obespecheniya kiberbezopasnosti bespilotnykh letatel'nykh apparatov* (Topical issues of ensuring the cybersecurity of unmanned aerial vehicles), *Radioelektronnyye tekhnologii*, 2016, no. 1 (in Russian).
11. Ryabko B. Ya., Fionov A. N. *Kriptograficheskie metody zashchity informatsii* (Cryptographic methods of information protection), Moscow, Goryachaya liniya — Telekom, 2012 (in Russian).
12. Antipov A. L., Bykovskii A. Yu., Egorov A. A., Kompanets I. N. *Procedura autentifikatsii robotizirovannykh agentov na osnove mnogoznachnoy i nechetkoj logiki* (The procedure for authenticating robotic agents based on multi-valued and fuzzy logic), *Radiotekhnika*, 2008, no. 8, pp. 97–104 (in Russian).
13. Belousov A. I., Tkachev S. B. *Diskretnaya matematika* (Discrete Math), Moscow, MGTU, 2006 (in Russian).
14. Kormen T. Kh., Leizerov Ch. I., Rivest R. L., Shtain K. *Algoritmy: postroenie i analiz* (Algorithms: construction and analysis), Moscow, Vil'yams, 2006 (in Russian).
15. Rassel S. Dzh., Norvig P. *Iskusstvennyy intellekt: sovremennyy podhod* (Artificial intelligence: a modern approach), Moscow, Vil'yams, 2006.
16. Platonov A. K., Karpov I. I., Kiril'chenko A. A. *Metod potentsialov v zadache prokladki trassy* (Method of potentials in the problem of laying a route), *Preprint Instituta prikladnoy matematiki ANSSSR*, 1974 (in Russian).
17. Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Romanov A. M. *Universal'naya bortovaya sistema upravleniya robotami razlichnykh tipov bazirovaniya i naznacheniya (realizatsiya printsipov unifikatsii i importozameshcheniya)* (The Universal On-Board Control System for Robots of Various Type of Deployment and Purpose (Implementation of the Principles of Unification and Import Substitution)), *Vestnik MGTU MIREHA*, 2015, vol. 1, no. 3, pp. 235–240 (in Russian).

А. С. Ющенко, д-р техн. наук, проф., robot@bmstu.ru,
МГТУ им. Н. Э. Баумана

Коллаборативная робототехника: состояние и новые задачи

Создание нового класса робототехнических систем — коллаборативных роботов требует решения ряда проблем, связанных с взаимодействием человека и робота. Деятельность человека-оператора сводится к наблюдению за функционированием робототехнической системы и к постановке текущих задач в режиме речевого диалога. От непосредственного управления движениями человек переходит к постановке текущих задач, как если бы он сотрудничал с человеком-ассистентом. При этом интерфейс оператора должен обеспечить человеку адекватное восприятие текущей сцены, а его команды должны быть "понятны" роботу-ассистенту. Существенную роль при этом играет система навигации, поскольку робот должен самостоятельно оценивать окружающую обстановку и планировать свой путь, в том числе и при наличии других движущихся объектов в рабочей зоне. Наиболее важные проблемы, которые нашли отражение и в программе первой международной конференции по коллаборативной робототехнике, состоявшейся в 2016 году, рассмотрены в данной работе.

Ключевые слова: коллаборативные роботы, человек-оператор, система навигации, лингвистические переменные, нечеткий логический вывод, речевой диалог, восприятие информации, многомодальный интерфейс

Введение

Основная тенденция современной робототехники — все более широкое внедрение робототехнических устройств во все сферы деятельности человека, включая медицину, космонавтику, работы в экстремальных ситуациях. Анализ мирового рынка робототехники показывает тенденцию преобладания темпов роста именно сервисной робототехники, предназначенной для содействия человеку в его деятельности. Отметим, что робототехнические системы (РТС), управляемые человеком, возникли уже на первом этапе становления робототехники. Это были системы копирующего, затем полуавтоматического и, наконец, супервизорного управления, назначением которых было обеспечение безопасности оператора в экстремальных условиях работы. Сегодня возник термин "коллаборативные роботы" (КР, collaborative robots, или co-robots), означающий совместную деятельность человека и робота, при которой человек становится партнером-руководителем, а робот — партнером-ассистентом. Основное отличие КР от разрабатываемых ранее робототехнических систем, управляемых человеком, — это определенная степень их автономности, предполагающая применение принципов искусственного интеллекта. Благодаря этому максимально упрощается задача управления роботом, решение которой становится доступным пользователю-непрофессионалу. Предполагается, что это обстоятельство должно привести к массовому применению робототехники в самых различных сферах деятельности человека, а по существу, к роботизации общества. По результатам первой международной конференции по коллаборативной робототехнике [1], а также обзоров научной литературы [2] можно составить следующую предварительную классификацию РТС, относимых сегодня к КР, по сфере применения:

- манипуляторы, работающие в той же рабочей зоне, что и человек, в целях оказания ему помощи, например, на сборочном конвейере или при обслуживании инвалидов. Именно для таких систем первоначально и был введен термин

"коллаборативный робот". Очевидно, что такой манипулятор должен быть адаптивным к условиям работы, включая поведение самого человека;

- мобильные роботы, обладающие автономной системой управления и выполняющие определенные операции по указаниям человека в помещениях — производственных или в сфере обслуживания, при условии, что в этих помещениях могут находиться и перемещаться другие люди. Сюда же можно отнести роботы, сопровождающие человека, в том числе в качестве гида или охранника;
- манипуляторы и мобильные роботы в составе робото-технологического комплекса (РТК), обеспечивающие безопасность пользователя и работу с интерфейсом, доступным практически без специальной подготовки. Здесь примером может служить гибкая производственная система Baxter [2];
- группы роботов, управляемых человеком (мультисистемные коллаборативные робототехнические системы), например, при патрулировании территории или помещений, при мониторинге местности в целях поиска взрывоопасных объектов [3, 4].

Заметим, что коллаборативные роботы по определению являются эргатическими (человеко-машинными) комплексами, что их отличает от традиционной робототехнической системы, предназначенной для автоматизации труда человека. Поэтому при их классификации необходимо учитывать и характер участия человека. По этому признаку можно выделить:

- роботы-ассистенты, выполняющие вспомогательные действия в рабочей зоне по речевым или иного характера (жестикуляция) указаниям человека;
- роботы-партнеры, сопровождающие человека и выполняющие по его указаниям функции либо наблюдения, либо воздействия на объекты внешнего мира;
- роботы-аватары, обеспечивающие оператору эффект присутствия в рабочей зоне с использованием систем виртуальной реальности.

Несмотря на различные области применения и конструктивные особенности, можно выделить ряд свойств, общих для всех коллаборативных РТС. Важнейшее требование, предъявляемое к КР, — это обеспечение безопасности взаимодействия с человеком-компаньоном в процессе совместной работы. В контексте промышленных роботов был введен термин *soft robotics* (мягкие роботы), характеризующий как конструкцию робота, включая манипуляторы с эластичным покрытием, так и, в первую очередь, особенности системы управления, обеспечивающие быстрый аварийный останов робота при опасности столкновения с препятствием в рабочей зоне или автоматический обход препятствия. Такие же требования предъявляются и к мобильным сервисными роботами, функционирующим в пространстве, в котором могут находиться подвижные препятствия — люди, другие роботы, транспортные средства. Для выполнения этого требования КР должен получать информацию о действиях человека в рабочем пространстве робота, о его текущем положении. Если речь идет о мобильных роботах-партнерах, то требование безопасности распространяется и на других людей, которые могут встретиться на пути робота.

Другим важным требованием является возможность для человека, не обладающего специальными знаниями, управлять действиями КР с учетом объективных ограничений психофизиологического характера, в том числе возможностей рецепторов человека, ограничения времени реакции и оперативной памяти, сложности воспринимаемых органами чувств образов ситуации. Это можно было бы назвать условиями "эргатической управляемости" КР. По аналогии с общей теорией управления здесь можно было бы ввести и термин "эргатическая наблюдаемость", имея в виду способность человека, наблюдающего за работой КР с помощью компьютерного интерфейса, включающего и речевой диалог, составить в своем сознании достаточно полную с точки зрения достижения поставленной цели картину мира.

Наконец, робот должен обладать в достаточной мере способностью к автономной работе. Как правило, он обладает трехмерной системой технического (компьютерного) зрения (СТЗ). Его база знаний позволяет распознавать объекты в пространстве рабочей сцены. В отличие от полностью автономных роботов решение задач навигации мобильных КР, задач распознавания и анализа состояния рабочей сцены в данном случае предполагает двусторонний обмен информацией с человеком. При использовании речевого управления этот обмен приобретает форму диалога человека-пользователя с роботом-партнером ("диалоговое управление"). В случае непосредственного включения человека в рабочий процесс (роботы-аватары) существенно усложняются требования к интерфейсу, который теперь должен включать систему стереозрения на стороне оператора и расширенные средства обратной связи — по силам и моментам, действующим на КР, тактильные ощущения

и др. Во всех случаях КР должен обладать возможностями самодиагностики, чтобы своевременно сообщать оператору о возможных нарушениях в системе управления, связи, обработки информации, ограничениях энергопитания.

Общими являются и требования информационной защиты системы управления КР, исключающей "перехват управления" со стороны других лиц. Здесь, помимо обычных средств кодирования управляющих действий и команд, могут быть применены такие средства, как анализ особенностей речи основного оператора, распознавание его лица. Эти средства могут быть использованы и для оценки состояния оператора в процессе работы системой управления КР, что также может быть необходимо для оценки его усталости, эмоциональной напряженности, адекватности команд, особенно в экстремальных ситуациях.

Наконец, развитая система управления КР, предназначенного для выполнения определенных операций в определенной среде, например КР для разведки пожара, должна накапливать как процедурные знания ("ситуация—действие"), так и знания об особенностях работы своего оператора, если это "персональный КР". В отличие от традиционного робота-автомата важнейшей функцией КР является помощь человеку-пользователю, которая может иметь как характер непосредственных действий КР в рабочей среде, так и характер информационной поддержки с помощью экспертных систем и баз знаний.

Представление ситуации в системе управления КР

Для представления информации о текущей ситуации в КР целесообразно использовать пространственно-семантическое представление. Так, в работе [5] вводится многомодальное представление окружающего пространства в виде многослойной карты рабочей зоны робота, которое включает топографический план, зоны ограничения движения, связанные с выполнением заданных операций, и данные бортовых сенсоров. Карта, полученная от лазерного сканирующего дальномера, используется для локализации робота на топографическом плане, а карта зоны безопасности, полученная с помощью комплексирования данных от лазерного сканирующего дальномера и массива сонаров, расположенных по периметру робота, позволяет оценивать наличие объектов вокруг робота в процессе его движения.

В общем случае пространственно-семантическое представление пространства включает описание объектов рабочей сцены и пространственно-временных отношений между ними. Особенность КР заключается в том, что это представление создается с участием человека — либо заранее, либо непосредственно в процессе работы. Поэтому для его описания целесообразно использовать нечеткие отношения.

К пространственным относятся нечеткие отношения положения и ориентации объектов, задаваемые функциями принадлежности, которые соответствуют восприятию этих отношений человеком [6], например "объект a_1 далеко, впереди справа и не-

много выше объекта a_2 ". Для полноты описания к таким отношениям добавляются так называемые интенциональные отношения, такие как R_1 — соприкасаться; R_2 — быть внутри; R_3 — быть на одной плоскости и т.д. Используя заранее сформированные в базе знаний функции принадлежности и средства наблюдения (СТЗ, лазерные дальномеры), КР самостоятельно может описывать ситуацию в терминах естественных пространственных отношений и сообщать об этом оператору в лингвистической форме. Эти же отношения могут использоваться оператором при формировании заданий роботу в процессе диалога. Заметим, что из совокупности элементарных пространственных отношений, используя формальные логические правила конъюнкции и дизъюнкции, можно получить практически любые отношения, встречающиеся на практике.

Текущая ситуация, включающая M объектов, в том числе робота или внешнего наблюдателя, описывается системой бинарных фреймов ($\langle \text{объект } m \rangle$, $\langle \text{отношение} \rangle$, $\langle \text{объект } n \rangle$), $m, n = 1, 2, \dots, M$. Если заранее установлены нечеткие бинарные отношения между всеми объектами, которые могут наблюдаться роботом в процессе движения, то мы получим нечеткую пространственно-семантическую сеть, или нечеткую карту. Используя такую карту, можно, в частности, осуществлять навигацию робота по наблюдаемым реперам, т.е. по объектам, положение которых было заранее известно.

Объекты рабочей сцены, в свою очередь, описываются субфреймами, содержащими их геометрические и физические признаки P_j , выраженные с использованием лингвистических переменных: $\langle \text{объект } m: P_1, P_2, \dots, P_m \rangle$. Нечеткие признаки объектов (протяженный объект, большая высота, большой размер и т.п.) задаются функциями принадлежности соответствующих лингвистических переменных, которые известны заранее [7]. Функции принадлежности этих лингвистических переменных, как и функции принадлежности, описывающие пространственные отношения, должны быть согласованы с техническими характеристиками мобильного робота и системы технического зрения. Тем самым обеспечивается согласование характеристик информационной системы КР с характеристиками пространственного восприятия человека.

Важная особенность задачи управления с использованием нечеткой модели рабочей сцены мобильным роботом, снабженным системой технического зрения, состоит в том, что в процессе движения меняется масштаб изображения, воспринимаемого телекамерой, установленной на роботе. Этот эффект приводит к необходимости введения двумерной функции принадлежности для определения текущего положения робота на плоскости. Например, функция принадлежности по курсовому углу ("немного справа", "справа" и т.п.) зависит также и от дальности D . Эта особенность системы технического зрения соответствует закону пространственной перспективы, свойственному зрительному восприятию пространства человеком [7].

Поскольку внешний мир непрерывно изменяется как за счет движения наблюдаемых объектов, так и за счет движения самого робота, то и описание ситуации изменяется во времени. Это обстоятельство требует учета в общем случае не только пространственных, но и временных отношений во внешнем мире, таких как "быть одновременно", "быть раньше", "следовать за". Такие отношения приходится использовать, в частности, при управлении мобильными роботами, перемещающимися в пространстве, содержащем другие движущиеся объекты [8]. Они позволяют обеспечить автоматическое сопровождение подвижных объектов или избежать столкновения с ними. Например, для того чтобы избежать столкновения с движущимся объектом, нужно предсказать его будущую траекторию и, в том случае, если она пересекает траекторию движения КР, ввести указание "быть раньше" в точке пересечения. Указание "следовать за" означает движение КР на расстоянии, не превышающем установленного от объекта сопровождения.

В общем случае ситуация S определяется фреймом, слотами которого служат имена объектов внешнего мира, естественные отношения между объектами, как пространственные, так и временные, а также другие признаки, характеризующие ситуацию. Получаемая таким образом оценка ситуации роботом представляет собой не что иное, как формализованную и осредненную оценку аналогичной ситуации человеком.

Совокупность обозначений (имен) заданных объектов в пространстве рабочей сцены и нечетких отношений между ними составляет словарь формального языка описания ситуации. Для того чтобы получить описание ситуации на этом языке, нужно определить синтаксис этого языка и семиотическое представление предположений. Используя введенную Д. А. Поспеловым терминологию, можно назвать язык используемых для описания ситуаций формально-логических отношений ситуационным языком. На ситуационном языке может быть организован диалог между роботом и человеком при анализе ситуации.

Структура и состав системы управления КР

Перечисленные выше требования позволяют составить представление об обобщенной структуре КР. Они, в определенной степени, отражены в структуре коллаборативного мобильного робота (КМР), рассмотренного в работе [5] (рис. 1). Робот оснащен сканирующим лазерным дальномером Hokuyo UTM-30LX, массивом ультразвуковых сонаров, размещенных по периметру основания робота, системой управления на базе одноплатного компьютера ODROID-XU4 и программно-аппаратным комплексом ST-Robotics для автономной навигации внутри помещений.

Система управления КМР имеет двухуровневую архитектуру, состоящую из базового блока и блока расширения. Базовый блок системы управления

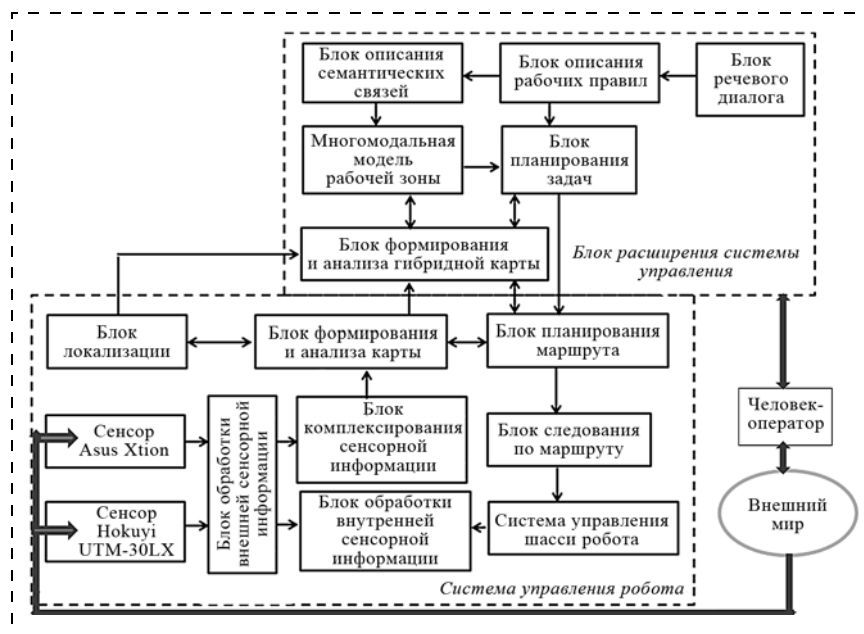


Рис. 1. Функциональная схема системы управления КМР

осуществляет сбор и анализ сенсорной информации, формирование карты рабочей зоны, локализацию робота и окружающих объектов, а также планирование маршрута и управление движением робота. По существу, это структура системы управления автономным сервисным мобильным роботом. Однако в структуру системы управления КР введен блок расширения системы управления, который обеспечивающий взаимодействие робота с человеком-оператором путем диалога на естественном языке, с помощью которого человеком формируется последовательность рабочих задач робота.

Блок расширения системы управления обеспечивает планирование маршрута движения робота на основании анализа данных гибридной карты рабочей зоны (см. ниже). Система управления содержит дополнительные обратные связи, включающие зрительную обратную связь, датчики безопасности, а также речевую обратную связь, реализуемую в форме речевого диалога КР с оператором. Заметим, что это уже нетрадиционная система управления, поскольку в ней отсутствуют как управляющий субъект, так и объект управления. Эта система управления при работе партнеров, один из которых является ведущим, партнером-руководителем, а второй — партнером-ассистентом.

Учитывая необходимость постоянного обмена информацией с оператором, целесообразно и программно-алгоритмическую часть системы формировать на базе естественных пространственно-временных отношений, нечеткого логического вывода и гибридных нейронечетких сетей.

Можно априори выделить стереотипы поведения, определяемые сложившейся ситуацией. Эти стереотипы поведения имеют вид продукционных правил: "если ситуация есть S_i , то тактика T_i ". Под тактикой мы понимаем совокупность правил поведения, выраженных с помощью лингвистических

переменных и определяемых поставленной целью. Эти правила ставят в соответствие типовой ситуации заранее определенное типовое движение робота. В свою очередь, каждое типовое движение также представляется совокупностью нечетких правил, связывающих показания датчиков робота и управляющие сигналы [9]. Типовые ситуации можно заранее заложить в нечеткую базу знаний робота. С использованием этой базы можно составить набор правил поведения (тактик), соответствующих преследованию нового объекта, выходу в определенную точку, заданную на многомодальной карте, прохождению в дверной проем, обходу внезапно появившегося препятствия на пути к цели, сопровождению движущихся объектов и т.п. Наличие тактик, полученных роботом заранее или в процессе обучения, существенно упрощает задачу оператора, избавляя его от управления робо-

том при решении рутинных задач. При этом сами тактики могут быть заложены в базу знаний робота путем обучения нейронечеткой сети, являющейся основой нечеткого контроллера.

В общем случае тактика поведения робота определяется фреймом задачи, который можно представить в следующем виде: $\langle \text{текущая ситуация } S_i \rangle \langle \text{объект управления } a_0 \rangle \langle \text{имя операции} \rangle \langle \text{сопутствующие объекты } j \rangle \langle \text{условия выполнимости операции} \rangle$. Объектом управления по умолчанию является сам мобильный робот, возможности которого имеются в базе данных. Эти возможности (габаритные размеры, масса, мощности двигателей, скорость, маневренность и т.п.) определяют условия выполнимости операции с учетом текущей ситуации и свойств рабочей среды (рельеф, сцепление колес с грунтом, несущие свойства грунта, характер препятствий). Условия выполнимости операции могут включать в себя и проверку постулов, которые должны быть выполнены после завершения операции. В случае, если задача, поставленная оператором, невыполнима, робот вступает в состояние уточняющего диалога с оператором.

Оператор может сообщить роботу только конечную цель движения в пространстве с частично известной структурой. В этом случае возникает проблема автономного планирования движения. Эта задача может быть решена методами нечеткого логического вывода с использованием принципа разрешения противоречий [10, 11].

Специфика управления мобильным роботом в динамической среде состоит в том, что движение препятствий нельзя рассчитать заранее. Чтобы избежать столкновений с движущимися препятствиями, необходимо знать их положение и предсказывать траекторию их движения. Тогда можно двигаться вдоль спланированной траектории, отклоняясь от нее в нужный момент, чтобы совершить маневр и

объехать препятствие. В работе [12] предлагается алгоритм управления роботом в динамической среде, основанный на трассировке подвижных препятствий. На первом этапе решается задача планирования маршрута по построенной методом сеточных функций карте помещения. Для этого используется хорошо известный алгоритм A*. Далее решается задача трассировки подвижных препятствий — определения текущего вектора состояния препятствия в каждый момент времени, синхронизированный с получением нового скана. Для построения списка препятствий сначала выполняется классификация и кластеризация точек скана. Кластеризация в данном случае проводится по евклидовому расстоянию между точками скана. Пороговое значение вычисляется исходя из расстояния до точки и углового разрешения лазерного дальномера.

Разработанный алгоритм предсказывает новое положение подвижного объекта на основе предположения, что наблюдаемый объект является твердым телом, перемещающимся по плоскости, и известен предыдущий вектор его состояния. Затем, используя полученное предсказание и параметры габаритной окружности, определяется новая оценка положения объекта, включающая оценку перемещения и курсового угла.

Задачи следования вдоль спланированного маршрута и обхода подвижных препятствий решаются совместно, так как при движении по заданной траектории подвижные объекты могут оказаться вблизи этой траектории. В этом случае необходимо совершить маневр обхода.

Для наведения КР на подвижный объект и его преследования или сопровождения могут быть использованы методы пропорциональной навигации. Так как движение робота осуществляется в среде с препятствиями, то на тактическом уровне предлагается использование нечеткого контроллера, допускающего лингвистическое описание ситуации при возникновении препятствий и позволяющего осуществлять управление роботом с использованием лингвистических команд. Основными правилами в разработанной базе правил являются правила пропорционального наведения и правила, обеспечивающие безопасность движения при возникновении препятствий в зоне действий робота [13].

При сопровождении роботом человека-оператора или при полуавтоматическом управлении движением КР может произойти потеря связи робота с оператором. В этом случае возникает задача движения КР в пространстве рабочей сцены с автоматическим возвращением робота к пользователю при потере связи. Для решения этой задачи может быть использована визуальная одометрия — метод оценки линейного и углового смещения робота с помощью анализа последовательности изображений, снятых установленной на нем парой камер [14]. Текущие координаты робота оцениваются при счислении смещений по положению и ориентации КР относительно особых точек. Вычисление пространственных координат особых точек, в свою очередь,

выполняется при решении задачи триангуляции с использованием разницы положения изображений одной и той же точки с двух телекамер. Чтобы вычислять смещение робота, отслеживается изменение положения особых точек с течением времени. Когда особые точки пропадают из поля зрения телекамер, они исключаются и заменяются на новые, что позволяет измерять координаты робота в изменяющейся среде. Определение координат робота дает возможность построить траекторию автоматического возвращения к оператору с помощью сплайнов третьей степени. Экспериментальные исследования показали, что наилучшие результаты могут быть получены путем комплексирования данных визуального одометра с данными колесной одометрии и с данными инерциального измерителя угловой скорости. При этом обеспечивается решение задачи возвращения в сумерках и темноте, на однотонных подстилающих поверхностях.

Речевой интерфейс и организация диалога

Речевой интерфейс является основным способом задания управляющей информации для диалоговой системы управления когнитивным роботом. Речевой интерфейс включает в себя модуль распознавания и лингвистический модуль. Модуль распознавания представляет собой устройство для преобразования речевых сигналов и их интерпретации в качестве отдельных слов или фраз. Лингвистический анализатор осуществляет синтаксический и семантический разбор высказывания, в результате которого должны быть заполнены слоты фрейма для описания действий.

Высказывания, представленные на языке ситуационного управления, могут быть выражены на внутреннем семиотическом языке, т.е. сведены к последовательности символов. В свою очередь, команда оператора, поступающая от модуля распознавания речи, также является последовательностью символов. Таким образом, взаимодействие модуля распознавания и лингвистического модуля сводится к преобразованию одной последовательности символов в другую на базе грамматики, построенной экспертом. При этом сам лингвистический анализатор может быть представлен в форме конечного автомата [15].

Практически все используемые в настоящее время способы распознавания речи основаны на сравнении произносимых слов с эталоном. Учитывая, что словарь языка ситуационного управления ограничен, целесообразно предварительно составить базу используемых слов и иметь возможность в реальных условиях дополнять базу робота (дообучать его) новыми словами, которые отсутствуют в базовом словаре. В большинстве работ, использующих такую концепцию, предполагается реализация модуля распознавания с помощью нейронных сетей. Так, в работе [16] для распознавания слов естественного языка используется трехслойная сеть Хэминга. Сеть предварительно обучается на произношение базовых слов команды определенным поль-

зователем. Этим, в частности, решается и задача обеспечения информационной безопасности системы управления, т.е. устраняется возможность доступа постороннего пользователя к управлению КР.

Диалог представляет собой последовательность речевых сообщений, которыми обмениваются робот и оператор. Исходным состоянием диалога служит команда оператора, структура которой была рассмотрена выше. Чаще всего развитие диалога происходит по одному из следующих сценариев: уточнение состава команды или уточнение операции. Сам сценарий описывается протофреймом, а конкретная реализация диалога фиксируется в виде фрейма-экземпляра. Например, для сценария "уточнение состава команды" протофрейм имеет следующий вид: <исходный текст команды>, <недостающий компонент>, <фокусирующий запрос оператору>, <вторичный текст команды>, <число итераций>, <окончательный вид команды>.

Одной из реализованных моделей диалога человека и робота оказалась модель, основанная на использовании сетей Петри. Эти сети позволяют осуществить моделирование асинхронного диалога, они удобны для формализации задачи машинного обучения [15]. Позициям сети Петри соответствуют состояния или текущие процессы в робототехнической системе, а переходам — поступающие события от других модулей системы диалога. Менеджер диалога в процессе своей работы в разработанной системе речевого диалогового управления обращается к модулю планирования и запрашивает предсказания дальнейшего состояния модели мира и решения по дальнейшим действиям вплоть до достижения цели.

Наличие моделей диалога повышает эффективность речевого интерфейса, так как дает возможность прогнозирования последующих действий оператора в рамках речевого взаимодействия. В самом простом случае прогнозирование может быть основано на данных, удовлетворяющих уточняющему запросу системы, имеющихся в самой системе, но не указанных оператором при инициации диалога. Перечень наиболее вероятных ответов можно использовать, например, в качестве "опорной" информации на этапе распознавания речевого сигнала.

Интерфейс КР может иметь многомодальную структуру и не сводиться к обмену речевыми сообщениями, но включать также и жесты. Дальнейшим развитием многомодального интерфейса является его дополнение системой двусторонней оценки эмоционального состояния оператора и имитации такого состояния роботом-партнером [17]. Для воспроизведения эмоций предлагались различные способы — чаще всего это либо компьютерная графика, либо антропоморфная конструкция, обтянутая искусственной кожей и, как правило, являющаяся копией лица конкретного человека. На рис. 2 (см. третью сторону обложки) в качестве примера приведены фотографии лица робота, разработанного Х. Ишигуро [18], рядом со своим прототипом, и робота Алиса [19] ("Нейроботикс", Зеленоград, РФ).

Лицо последнего робота оснащено девятнадцатью актуаторами (сервоприводами), которые деформируют силиконовую кожу головы и тем самым управляют мимическим аппаратом лица робота.

Вопросы формализации эмоций изучались П. Экманом, предложившим описание мимического состояния лица человека в виде массива "показателей движения" (*action unit*, AU), характеризующих определенное эмоциональное состояние [20]. Формализовав это состояние, можно реализовать адаптивную нейросеть, основанную на системе нечеткого вывода и позволяющую определить эмоциональное состояние по наблюдаемому мимическому состоянию лица. Может быть решена и обратная задача — воспроизведение определенного мимического состояния на "лице" робота. Поскольку КР предусматривает интерактивное речевое общение с человеком, то "эмоциональное" состояние необходимо моделировать с помощью сервисного робота не только при оценке той или иной ситуации, но и в качестве артикуляции речи, т.е. ее "эмоционального сопровождения". Такая поддержка речевого диалога существенно облегчает понимание сообщений человеком, что особенно важно в экстремальных ситуациях.

Заключение

Роль оператора — пользователя КР существенно изменяется. Теперь оператор управляет не отдельными движениями, а предметной деятельностью или поведением робота путем постановки задач подобно тому, как он работал бы с человеком-ассистентом. Сходство еще более усиливается при использовании речевого общения. Диалоговый способ управления существенно упрощает задачи оператора и практически не предъявляет к нему никаких специальных требований, за исключением знакомства с общими синтаксическими правилами проблемно-ориентированного языка диалога. Такой способ делает доступным управление роботом пользователем, не имеющим специальной подготовки. Большое значение для обеспечения эффективности управления приобретает и анализ психологических проблем взаимодействия человека и "интеллектуальной" робототехнической системы, связанных с "взаимным" пониманием ситуации и задачи, а также выбор наиболее целесообразного поведения для достижения поставленной цели.

Планирование роботом своих действий с учетом непрерывно изменяющейся рабочей среды обеспечивает безопасность его применения в людном помещении. В перспективе применение гибридной нейронечеткой сети позволит обеспечить обучение КР на основе наблюдения за работой самого человека. Задача "взаимопонимания" человека и КР может быть существенно облегчена за счет средств имитации "эмоционального состояния" КР и анализа состояния самого оператора. К новым задачам, которые требуют внимания исследователей КР, следует отнести задачу "смешанного" многоагентного управления, т.е. задачу управления коллекти-

вами, включающими и людей, и группы роботов. Особую роль в изучении проблем управления КР должны играть проблемы психологии взаимодействия человека и робота [21].

Список литературы

1. **Interactive Collaborative Robotics.** First international Conference, ICR 2016 / Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI 9812, 254 p.
2. **The Robot Report.** URL: <http://www.therobotreport.com>
3. **Smirnov A., Kashevnik A., Mikhailov S., Mironov M., Petrov M.** Smart M3-Based Robot Interaction Scenario for Coalition Work. Interactive Collaborative Robotics. First international Conference, ICR 2016 / Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI 9812. P. 199–207.
4. **Михайлов Б. Б., Назарова А. В., Ющенко А. С.** Автономные мобильные роботы — навигация и управление // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 2 (175). С. 48–67.
5. **Kharlamov A., Ermishin K.** Voice Dialogue with a Collaborative Robot Driven by Multimodal Semantics. Interactive Collaborative Robotics. First international Conference, ICR 2016 / Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI 9812. P. 225–233.
6. **Ющенко А. С.** Диалоговое управление роботами на основе нечеткой логики // Тр. Междунар. конф. "Экстремальная робототехника". 2015. С. 143–146.
7. **Володин Ю. С., Михайлов Б. Б., Ющенко А. С.** Нечеткая классификация препятствий мобильным роботом с использованием телевизионной системы пространственного зрения // Сб. науч. тр. 6-й Междунар. науч.-практ. конф. "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте". 2011. Т. 1. С. 372–380.
8. **Воротников С. А., Ермишин К. В.** Мультиагентная сенсорная система сервисного мобильного робота // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. Вып. 6. С. 50–59.
9. **Ющенко А. С.** Диалоговое управление роботами на основе нечеткой логики // Экстремальная робототехника. Сб. докладов всеросс. науч.-техн. конф. СПб: Политехника-сервис, 2015. С. 143–146.
10. **Ющенко А. С.** Интеллектуальное планирование в деятельности роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 3. С. 5–18.
11. **Магазов С. С.** Когнитивные процессы и модели. М.: Изд. ЛКИ, 2007. 248 с.
12. **Герасимов В. Н.** К вопросу управления движением мобильного робота в динамической среде // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1 (2). С. 44–51.
13. **Ющенко А. С., Тачков А. А.** Интегрированная система управления пожарным разведывательным роботом // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2012. Спец. выпуск № 6. Робототехнические системы. С. 106–111.
14. **Девятериков Е. А., Михайлов Б. Б.** Визуальный одометр // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. Спец. выпуск № 6. С. 68–82.
15. **Жонин А. А.** Алгоритм обучения менеджера диалога речевой диалоговой системы управления роботом // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. научных трудов международной конференции. М.: Физ. мат. лит, 2011. С. 395–406.
16. **Majewski M., Kacalak W.** Speech-Based Interfaces with Augmented Reality and Interactive Systems for Controlling Mobile Cranes // First international Conference, ICR 2016 / Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI 9812. P. 89–98.
17. **Yuschenko A., Vorotnikov S., Konyshev D., Zhonin A.** Mimic Recognition and Reproduction in Bilateral Human-Robot Speech Communication // Interactive Collaborative Robotics. First international Conference, ICR 2016 / Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI 9812. P. 133–142.
18. **Hiroshi Ishiguro Laboratories — Robots.** URL: <http://www.geminoid.jp/en/robots.html> (date of access 01.08.2014).
19. **Нейроботикс — Алиса Зеленоградская.** URL: <http://neurobotics.ru/robotics/antropomorphic-robots/alice> (дата обращения 01.08.2014).
20. **Ekman P., Friesen W., Hager J.** Facial Action Coding System (FACS). URL: <http://www.paulekman.com/facs/>, 2002 (date of access 01.08.2014).
21. **Ющенко А. С.** Состояние и перспективы диалогового управления роботами // Труды Института психологии РАН. Актуальные проблемы психологии труда инженерной психологии и эргономики. Вып. 7. М.: Изд-во Института психологии РАН, 2015. С. 408–423.

Collaborative Robotics — State of Art and New Problems

A. S. Yuschenko, robot@bmstu.ru, Educational Center "Robototekhnika" of Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, 105037, Russian Federation

Corresponding author: **Yuschenko Arkady S.**, Professor, D. Sc., Educational Center "Robototekhnika" of Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, 105037, Russian Federation, e-mail: robot@bmstu.ru

Accepted on September 01, 2017

The new branch of robotics has been formed nowadays as a collaborative robotics. It seems as a natural result of the developments in the area of manipulation and mobile robots controlled by human operator. Evolution of robotics intended to enlighten human's work resulted in creation of autonomous robots with multimodal interface which make it possible to control a robot for a human without special training. The safety of such robotic systems is to be guaranteed as for operator himself as for other humans in the working area of robotic system. Development of collaborative robotic systems is connected with the problems of human-robot interaction. The human operator can only observe the behavior of the robotic system and state the new tasks in the form of speech dialogue. From the tasks of movement control the operator comes to the tasks formulation as if he collaborates with a human — assistant. So the interface of operator has to propose him an adequate perception of the current situation and his instructions are to be "clear" for robot — assistant. Important part in the autonomous robot control is the navigation system proving the robot to appreciate the environment and to plan its own way in presence of other moving objects. One of the tasks of control is the robot return in case of communication loss with the operator. The task is more complicated for operator if it is necessary to control a group of autonomous robots to fulfil the tasks of the environment monitoring, radiation or chemical reconnaissance etc. Dialogue control may be enlightened for human by "emotional" support of speech communication by demonstration of mimic expression of robot's face. The mutual "understanding" demands also the analysis of the human state by the robot. It is also necessary to pay attention at human possibilities to perceive information and adopt the necessary decision. The possible way of coordination of human-robot possibilities are the linguistic variables application and fuzzy logic inference as on the stage of information perception as on the stage of actions planning and decision adoption. The "natural" relation of space and time make it more close the human-robot dialogue to the dialogue between human-master and human-assistant. The most important problems of mentioned above were under discussion at the first international conference on collaborative robotics on 2106 and are reflected in the paper.

Keywords: collaborative robots, human-operator, navigation system, linguistic variable, fuzzy logic inference, robotic systems, speech dialogue, speech emotional support, information perception, multimodal interface

For citation:

Yuschenko A. S. Collaborative Robotics — State of Art and New Problems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 812–819.

DOI: 10.17587/mau.18.812-819

References

1. **Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R.** ed. *Interactive Collaborative Robotics. First international Conference, ICR 2016*, Springer, LNAI 9812, 254 p.
2. **The Robot Report**, available at: <http://www.therobotreport.com>
3. **Smirnov A., Kashevnik A., Mikhailov S., Mironov M., Petrov M.** Smart M3-Based Robot Interaction Scenario for Coalition Work, *Interactive Collaborative Robotics. First international Conference, ICR 2016*, Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov, Springer, LNAI 9812, pp. 199–207.
4. **Mikhailov B. B., Nazarova A. V., Yuschenko A. S.** *Avtonomnye mobil'nye roboty — navigatsiya i upravlenie* (Autonomous mobile robots- navigation and control), *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2016, no. 2 (175), pp. 48–67 (in Russian).
5. **Kharlamov A., Ermishin K.** Voice Dialogue with a Collaborative Robot Driven by Multimodal Semantics, *Interactive Collaborative Robotics. First international Conference, ICR 2016*, Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov, Springer, LNAI 9812, pp. 225–233.
6. **Yuschenko A. S.** Dialogue Mode of Robot Control on the Base of Fuzzy Logic, *Transaction of the Conference Extreme Robotics*, S-Pb., Politechnika service, 2015, pp. 143–146 (in Russian).
7. **Volodin Yu. S., Mikhailov B. B., Yuschenko A. S.** *Nechetkaya klassifikatsiya prepyatstviy mobil'nym robotom s ispol'zovaniem televizionnoi sistemy prostranstvennogo zreniya* (Fuzzy classification of obstacles by mobile robot with 3D computer vision system), *Proceedings of International Conference "Integrated Models and Soft Calculations in Artificial Intelligence"*, 2011, vol. 1, pp. 372–380 (in Russian).
8. **Vorotnikov S. A., Ermishin K. V.** *Mul'tiagentnaya sensornaya sistema servisnogo mobil'nogo robota* (Intelligent Control System of a Service Mobile Robot), *Vestnik BMSTU Priborostroenie*, 2012, Special iss. 6 "Robotic Systems", pp. 50–59 (in Russian).
9. **Yuschenko A. S.** *Dialogovoe upravlenie robotami na osnove nechetkoi logiki* (Dialogue Mode of Robot Control on the Base of Fuzzy Logic), *Transaction of the Conference Extreme Robotics*, S-Pb., Politechnika service, 2015, pp. 143–146 (in Russian).
10. **Yuschenko A. S.** *Intellektual'noe planirovanie v deyatel'nosti robotov* (Intelligent Planning of Work of Robots), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2005, no. 3, pp. 5–18 (in Russian).
11. **Magazov S. S.** *Kognitivnye protsessy i modeli* (Cognitive processes and models), Moscow, LKI, 2007, 248 p. (in Russian).
12. **Gerasimov V. N.** *K voprosu upravleniya dvizheniem mobil'nogo robota v dinamicheskoi srede* (To the problem of a mobile robot control in the dynamic environment), *Robototekhnika i Technicheskaya Kibernetika*, 2014, no. 1 (2), pp. 44–51 (in Russian).
13. **Yuschenko A. S., Tachkov A. A.** *Integrirovannaya sistema upravleniya pozhar'nym razvedyvatel'nym robotom* (An integrated Control System of a Fire Reconnaissance Robot), *Vestnik BMSTU Priborostroenie*, 2012, Special iss. 6 "Robotic Systems", pp. 106–111 (in Russian).
14. **Deveterikov E. A., Mikhailov B. B.** *Vestnik BMSTU Priborostroenie*, 2012, Special iss. 6 "Robotic Systems", pp. 68–82 (in Russian).
15. **Zhonin A. A.** *Algoritmy obucheniya menedzhera dialoga rechevoi dialogovoi sistemy upravleniya robotom* (Training Algorithm for dialogue manager of a speech dialogue system), *Integrated Models and Soft Calculations in Artificial Intelligence, Proceedings of International Conference*, 2011, pp. 395–406 (in Russian).
16. **Majewski M., Kacalak W.** Speech-Based Interfaces with Augmented Reality and Interactive Systems for Controlling Mobile Cranes, *First international Conference, ICR 2016*, Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov, Springer, LNAI 9812, pp. 89–98.
17. **Yuschenko A., Vorotnikov S., Konyshev D., Zhonin A.** Mimic Recognition and Reproduction in Bilateral Human-Robot Speech Communication. *Interactive Collaborative Robotics, First international Conference, ICR 2016*, Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov, Springer, LNAI 9812, pp. 133–142.
18. **Hiroshi Ishiguro Laboratories** — Robots, available at: <http://www.geminoid.jp/en/robots.html> (date of access 01.08.2014).
19. **Neurobotiks** — *Alisa Zelenogradova*, available at: <http://neurobotics.ru/robotics/antropomorfic-robots/alice> (date of access 01.08.2014).
20. **Ekman P., Friesen W., Hager J.** Facial Action Coding System (FACS), available at: <http://www.paulekman.com/facs/>, 2002 (date of access 01.08.2014).
21. **Yuschenko A. S.** *Sostoyaniye i perspektivy dialogovogo upravleniya robotami* (The state of art and perspectives of robot dialogue control), *Proceedings of Institute of psychology RAN "Actual problems of trade psychology and ergonomics"*, iss. 7, ed. Oboznov A. A. and Zhuravlev A. L., Moscow, Institute of psychology RAN, 2015, pp. 408–423 (in Russian).

УДК 531.8

DOI: 10.17587/mau.18.819-824

В. Г. Градецкий, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., gradet@ipmnet.ru,

И. Л. Ермолов, д-р техн. наук, проф. РАН, ст. науч. сотр.,

М. М. Князьков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., **Е. А. Семенов**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

А. Н. Суханов, мл. науч. сотр.,

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН), Москва

Силовое взаимодействие мобильного нагруженного робота с грунтом¹

Исследованы силовые взаимодействия с различными грунтами как отдельного нагруженного мобильного робота, так и группы роботов. Рассмотрено взаимодействие с грунтом через колесную систему корпуса робота с грузом и взаимодействие отдельного нагруженного колеса с грунтом. Приведены результаты моделирования взаимодействия нагруженного робота с различными грунтами.

Ключевые слова: мобильный робот, грунтовая поверхность, силовое взаимодействие, система сил, особенности движения, проскальзывание

¹ Работа поддержана грантом РФФИ № 16-29-04199 офи_м.

Введение

До настоящего времени ведутся дискуссии о силах, действующих на колесные механизмы. Различные точки зрения в основном касаются природы сил инерции, трактовки координат точек приложения сил при проскальзывании колес и сил трения качения, нахождения коэффициентов этих сил. В работах [1, 2, 6] силы инерции рассматриваются как действующие на колесо силы, в других работах, например [3, 4], считается, что силы инерции на самом деле не действуют, а являются результатом действия других внешних сил.

В ряде работ сила сцепления колеса с грунтом заменяется "продольной силой, параллельной поверхности дороги", или заменяется касательной реакцией дороги [5]. На самом деле сила сцепления колеса с грунтом является физической силой, составляющие которой рассматриваются как проекции на оси координат.

Природа силы трения качения довольно сложна, и ее изучение и уточнение продолжают. В работе [7] рассматривается в качестве причины возникновения трения качения взаимное частичное проскальзывание поверхности колеса и основания, что означает проявление сил сопротивления качению по поверхности контакта. Движения нагруженного робота в зависимости от назначения и доставки груза могут происходить не только по условно абсолютно жесткому грунту, но и, чаще всего, по деформируемому грунту, а поверхность его может быть не горизонтальной и неоднородной. Однако часто вместо действительной физической природы грунта рассматриваются упрощенные механические модели и проводятся многочисленные экспериментальные исследования, в основном производителями автомобилей.

Под силой сопротивления качению будем в дальнейшем понимать выражение $F_k = f_0 \frac{Q}{r} = fQ$, где Q — вес робота и груза, приходящийся на одно колесо, r — радиус колеса, $f = \frac{f_0}{r}$ — коэффициент сопротивления качению колеса. На эту величину смещается точка соприкосновения колеса с грунтом от вертикальной составляющей силы веса Q при движении со скольжением. В зарубежной и отечественной литературе имеются различные данные нахождения коэффициента f [9]. Поэтому, чтобы избежать этой неопределенности, иногда силу трения качения выражают через момент M трения качения, считая, что касательное усилие расходуется на преодоление действия силы и момента M нормальных усилий. Тогда $F_k = \frac{M}{r}$.

В статье рассматриваются силы, действующие на колеса нагруженного мобильного робота при движении по грунтам.

Анализируются различные случаи сил взаимодействия колеса с деформируемым грунтом, и при-

водится условие движения нагруженного мобильного робота без проскальзывания. Приводятся показатели и параметры движения колесного нагруженного мобильного робота, связанные с основными особенностями движения.

Силы, действующие на нагруженный мобильный робот

В общем случае мобильный робот может двигаться по горизонтальной или наклонной поверхности. В системе нагружения груз не закреплен на платформе робота и удерживается в результате превышения силы трения по сравнению с силой, вызывающей скольжение. Действующие здесь силы — веса груза и робота, приложенные в точках центров масс груза и платформы, силы кулонова трения и трения скольжения, возникающие в поверхности соприкосновения груза и платформы, приложенные тяговые усилия к ведущим колесам и силы реакции дороги. Избежать скольжения незакрепленного груза относительно платформы робота можно при условии недостижения критического угла α наклона местности, $\alpha < \alpha_{кр}$, и выполнения условия непревышения силой скольжения силы кулонова трения, т.е. $F_T \geq F_c(\alpha)$, F_T — тяговая сила робота на ведущих колесах; R_x и R_z — касательная и нормальная реакции дороги, параллельные и перпендикулярные поверхности движения; F_H — сила сопротивления разгону, F_P — сила сопротивления подъему (рис. 1). Приведенная на рис. 1 ситуация идеальная, поскольку груз должен быть гарантированно закреплен.

В случае закрепления груза можно считать, что центры масс груза весом G_1 и робота весом G_2 совпадают и общий вес равен сумме $G = G_1 + G_2$. Для показанной схемы нагружения и взаимодействия сил проектируется система управления исходя из обычных условий эксплуатации.

В ситуации, когда один сплошной груз переносится двумя роботами или группой роботов [8], в зависимости от рельефа местности, например при преодолении уклонов, могут возникать моменты сил, действующие на груз через платформу робота, что может привести к поломке закрепленного груза или платформы. В этом случае в разрабатываемой системе управления должны быть предусмотрены компенсирующие воздействия на выравнивание груза относительно платформы за

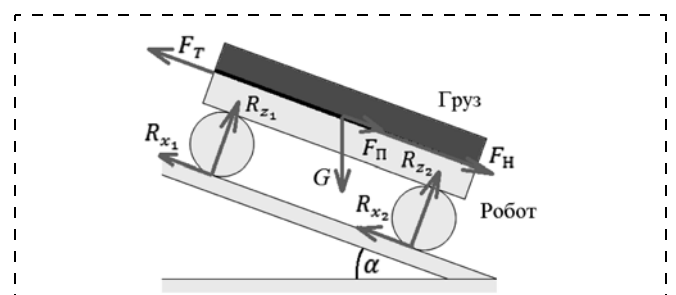


Рис. 1. Силы, действующие на нагруженный робот при подъеме

счет действующих сил и наличия упругого податливого звена разной жесткости, в том числе управляемой упругости или жесткости.

В связи с тем, что рельеф местности, по которой движется нагруженный робот, заранее неизвестен, также требуется введение дополнительного звена в системе управления, предусматривающего выравнивание или компенсацию за счет введения дополнительного момента первоначального положения груза относительно корпуса робота.

Проектируя все силы, действующие на нагруженный робот, на горизонтальную поверхность, получим уравнение движения нагруженного робота:

$$R_{x_2} + R_{x_1} - F_{\Pi} - F_B - F_H = 0. \quad (1)$$

Учитывая, что $F_K = f(R_{z_1} + R_{z_2})$, $F_g = F_K + F_{\Pi}$, получим:

$$F_T - F_K - F_{\Pi} - F_B - F_H = 0 \\ \text{или } F_T - F_g - F_B - F_H = 0. \quad (2)$$

Здесь $F_H = \frac{G}{g} \dot{v} \delta$; $\dot{v}$ — ускорение робота, δ — коэффициент учета вращающихся масс; F_B — внешние силы; $F_{ki} = fR_{zi}$ — сила трения (сила сопротивления качению, $i = 1, 2$); f — коэффициент силы трения; F_g — сила сопротивления дороги, $F_g = fG \cos \alpha + G \sin \alpha = G(f \cos \alpha + \sin \alpha)$, т.е.

$$F_g = F_K + F_{\Pi}; \quad (3)$$

$$F_{\Pi} = G \sin \alpha;$$

F_x — продольная сила, параллельная поверхности;
 F_z — вертикальная нагрузка.

При равномерном движении робота

$$F_T - F_g - F_B = 0. \quad (4)$$

Силовое взаимодействие колес мобильного робота с грунтом

Для обеспечения надежного движения нагруженного колесного робота по сложным грунтам или движения двух или нескольких роботов, несущих общий груз, существенное значение имеет анализ сил, действующих на колесо робота со стороны грунта. Рассмотрение силового взаимодействия колеса робота с грунтом особенно важно при совершении маневров, обходе препятствий, поворотах, разворотах, резких изменениях скоростей в целях принятия соответствующих мер, исключающих проскальзывание или предотвращающих потери устойчивости. Проблема повышения устойчивости и надежности движения колесных транспортных средств решается в течение многих лет в автомобильной и других отраслях промышленности многими разработчиками в соответствии с разработанными подходами [10]. Решение этой проблемы в мобильной робототехнике связано с учетом особенностей движения нагруженных роботов, среди которых необходимо отметить повышенную автономность, мобильность, маневренность, надеж-

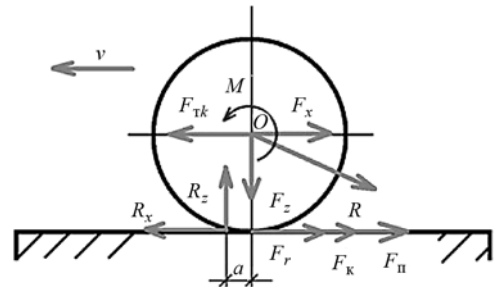


Рис. 2. Силы взаимодействия ведущего колеса нагруженного робота при качении по недеформируемой поверхности

ность перемещения в экстремальных и недетерминированных условиях окружающей среды. Одной из главных мер является исключение проскальзывания [1, 2].

В общем случае, принимая во внимание рекомендации автомобилестроителей, отметим, что на колесо нагруженного робота действуют следующие силы (рис. 2) при движении по прямой:

F_{Tk} — сила тяги, приложенная к колесу;

Q — вес робота и груза, приходящийся на одно колесо;

m — масса робота и груза, приходящаяся на одно колесо;

F_K — сила сопротивления качению, $F_K = fQ$, f — коэффициент сопротивления качению;

F_r — сила сцепления колеса с грунтом, $F_r = Q\mu_0$;

μ_0 — коэффициент сцепления колеса с грунтом; силы F_x и F_z и момент M действуют на колесо со стороны робота;

F_z — вертикальная нагрузка на колесо;

силы R_x и R_z действуют на колесо со стороны дороги — касательная и нормальная реакции дороги;

R_x — продольная сила, параллельная поверхности;

F_{Π} — внешние силы сопротивления;

R — результирующая реакция.

Сила тяги колеса равна сумме всех действующих физических сил:

$$F_{Tk} = \sum_{i=1}^n F_i; F_{Tk} = m\dot{v} + F_K + F_r + F_{\Pi}. \quad (5)$$

В зависимости от режима качения колеса сила F_x может быть направлена как в сторону движения робота, так и в противоположную. R_x — касательная реакция дороги — считается положительной, если направлена в сторону движения, и отрицательной, если направлен наоборот.

Наличие проскальзывания при движении колеса (рис. 3) приводит к появлению пятна контакта "a". Проскальзывание значительно ухудшает динамику нагруженного робота.

Уравнение моментов, действующих на колесо, имеет вид

$$M_k = J\ddot{\phi} + m\dot{v}r + fQr + \mu_0Qr + M_{\Pi}. \quad (6)$$

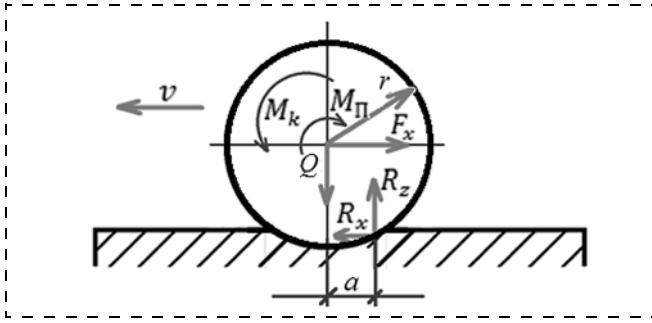


Рис. 3. Силы взаимодействия колеса нагруженного робота с деформируемым грунтом

Учитывая, что физический смысл проскальзывания колеса есть непревышение приводным моментом на колесе момента сил трения в продольном направлении, получим, что условием отсутствия проскальзывания является следующее условие:

$$M_k \leq \mu_c R_z r. \quad (7)$$

Здесь M_k — приводной момент на колесе; r — радиус колеса; R_z — нормальная реакция веса колеса и груза, приходящегося на одно колесо; μ_0 — коэффициент сцепления колеса с грунтом; $M_п$ — момент всех внешних сил; μ_c — коэффициент трения в продольном направлении.

Неравенство означает, что проскальзывание не возникает, если приводной момент не превышает момент сцепления с поверхностью, т.е. приложенные к точке контакта колесо — грунт силы не превышают предельное значение силы трения, а значит, и силы сцепления. Если тяговая сила больше силы сцепления, то робот движется со скольжением ведущих колес.

При возникновении проскальзывания силы трения уменьшаются. Экспериментально было показано [1], что коэффициент $\mu(\lambda)$ продольной силы трения подчиняется закону Гаусса, т.е.

$$\mu(\lambda) = \mu_c e^{-(\lambda^2)/b} = \mu_c \exp(-(\lambda^2)/b), \quad (8)$$

где b — коэффициент, получаемый экспериментально.

В литературе, относящейся к автомобилестроению [2, 5], коэффициент проскальзывания определяется как следующее отношение: $\lambda = \frac{\dot{\phi}r - v_p}{\max(v_p, \dot{\phi}r)}$, где ϕ —

угол поворота колеса, v_p — линейная скорость колеса робота, v_c — линейная скорость колеса робота, r — радиус колеса, μ_c — коэффициент трения в продольном направлении. Проскальзывание отсутствует, если $\dot{v}_p = \dot{v}_c = \dot{\phi}r$. В случае движения с проскальзыванием $v_c = \dot{\phi}r > v_p$. Заметим, что линейная скорость v_p робота равна линейной скорости колеса v_c без проскальзывания. Движущий момент, вызывающий проскальзывание, равен $M_k = \mu_c \exp(-(\lambda^2)/b) Qr$.

Результаты параметрического моделирования

Следуя данным, приведенным в работе [3], на рис. 4–6 (см. третью сторону обложки) представлены расчетные номограммы, позволяющие определить влияние грунта и отношения сил на некоторые параметры робота и показатели проходимости, зависящие от грунта. Зависимость давления в пятне контакта $q_{ш}$ от геометрических параметров шины показана на рис. 4. Эта зависимость приведена в соответствии с изменением ширины и высоты профиля шины колеса робота:

$$q_{ш} = \pi h_r \frac{(p_0 + p_w)}{2b} \left(\frac{B}{H} + \frac{3H}{2B} \right) \left(1 - \frac{h}{B} \right). \quad (9)$$

Здесь h_r — глубина колеи, м; h — прогиб шины, м; p_0 — давление на грунт от жесткости каркаса шины, 10^5 Па; p_w — внутреннее давление воздуха в шине, 10^5 Па; b — ширина протектора шины, м; B — ширина профиля шины, м; H — высота профиля шины, м.

На рис. 5 представлено изменение коэффициента сопротивления качению f в зависимости от прогиба и нагрузки на колесо:

$$f = 3,5 p_0 \psi h^2 (B^2 + 1,5 H^2) \frac{B - 0,3h}{PHB^2} + 0,6 qz \frac{b + b_{Ki}}{P}. \quad (10)$$

Здесь ψ — коэффициент свободной силы тяги; h — прогиб шины, м; P — нагрузка, Н; q — вертикальная координата неровностей микропрофиля, м; z — среднеквадратичное значение перемещения; b_{Ki} — ширина протектора колеи, м; b — ширина протектора шины, м; H — высота профиля шины, м; p_0 — давление на грунт от жесткости каркаса шины, 10^5 Па.

Зависимость нагрузки p на колесо от деформации шины и типа грунта (рис. 6):

$$p = \frac{E h_r}{\frac{2 E h_r}{\pi p_{so}} \arctg\left(\frac{\pi(H_r - h_r)}{2 b_{пр}}\right) + a b_{пр} \arctg \frac{H_r - h_r}{a b_{пр}}}. \quad (11)$$

Здесь E — модуль деформации; h_r — глубина колеи; H_r — глубина мягкого слоя грунта; p_{so} — давление в колесе; $b_{пр}$ — ширина протектора; $a = 0,64(1 + b_{пр}/H_r)$ — коэффициент проходимости.

В таблице приведены параметры различных типов грунтов, по которым может двигаться мобильный робот.

Параметры грунтов

Тип грунта	Модуль деформации E , МПа
Суглинок мягкопластичный	6
Суглинок тугопластичный	19
Песок средней крупности, рыхлый	20
Песок средней крупности, средней плотности	28
Песок средний, рыхлый	15
Песок мелкий, средней плотности	25
Песок мелкий, плотный	35

Заклучение

Проведено исследование силовых взаимодействий нагруженного мобильного робота с грунтовыми поверхностями. То же самое можно отнести к группам роботов. Рассматривалось взаимодействие с грунтом корпуса робота с навесным грузом через колесную систему и взаимодействие отдельного нагруженного колеса с грунтом. Учтены особенности движения нагруженного мобильного робота, рассмотренные в выполненных ранее многочисленных исследованиях производителей автомобилей.

На основе анализа подходов к пониманию природы действующих на нагруженный мобильный робот сил был обоснован выбор системы сил. Несмотря на то, что в ряде отечественных и зарубежных работ [1–3] силы инерции считаются действующими силами, в нашем исследовании предложено трактовать силы инерции как фиктивные силы, которые не являются силами взаимодействия тел в природе, что было впервые показано в работах [5, 7] академиком А. Ю. Ишлинским. Ведутся дискуссии относительно физической природы пятна контакта [2, 9], а также о силах сцепления колеса с грунтом [1, 6]. Сила сцепления колеса с грунтом считается нами физической силой, составляющие этой силы являются проекциями на оси координат. Движение робота по инерции трактуется как такое, которое может быть вызвано

только в результате внешних приложенных сил. Обоснованная система сил включает силы тяги, веса, трения качения, трения скольжения, сцепления колеса с грунтом, внешние силы.

Список литературы

1. Zielinska T., Chmielniak A. Synthesis of Control Law Considering Wheel-Ground Interaction and Contact Stability // Proceed. of Twelfth Int. Conf. of Climbing and Working Robots. CLAWAR-2012 Turkey, 9–11 Nov. 2012. Mobile Robotics: Solutions and Challenges, World Scientific. 2012. P. 1039–1046.
2. Okada T., Tezuka S., Wada H. Smooth Walk of a Skid-Steering Vehicle Consisting of Feet Jointed to Each Wheel RIM // Proceed. of CLAWAR-2015 Conf., USA, 23–26 July, 2015. Adaptive Mobile Robotics. P. 585–594.
3. Вольская Н. С. Оценка проходимости колесных машин при движении по неровной грунтовой поверхности. М.: МГИУ, 2007. 215 с.
4. Ишлинский А. Ю. Механика. Идеи, задачи, приложения. М.: Наука, 1985. 624 с.
5. Вахламов В. К. Конструкция, расчет и эксплуатационные свойства автомобилей. М.: Академия, 2007. 560 с.
6. Muro T., O'Brien J. Terramechanics, Land Locomotion Mechanics. Tokyo: A. A. Balkema Publishers, 2004.
7. Ишлинский А. Ю. Трение качения // Прикладная математика и механика. 1938. Т. 2, Вып. 2. С. 245–260.
8. Градецкий В. Г., Ермолов И. Л., Князьков М. М., Семенов Е. А., Соболевников С. А., Суханов А. Н. О научных задачах выполнения транспортных операций группой мобильных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. № 3. С. 57–62.
9. Агейкин Я. С. Проходимость автомобилей. М: Машиностроение, 1981. 232 с.
10. Беккер М. Г. Введение в теорию систем "местность—машина": Пер. с англ. / Под ред. В. В. Гуськова. М.: Машиностроение, 1973. 520 с.

Force Interaction between Soil and Loaded UGV

V. G. Gradetskiy, gradet@ipmnet.ru, I. L. Ermolov, ermolov@ipmnet.ru,
M. M. Knyazkov, ipm_labrobotics@mail.ru, E. A. Semenov, sim1165@mail.ru,
A. N. Sukhanov, sukhonov-artyom@yandex.ru,
A. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, 119526, Russian Federation

Corresponding author: Ermolov Ivan L., Dr. Sc., Professor RAS, Leading Researcher,
Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: ermolov@ipmnet.ru

Accepted on September 05, 2017

This paper presents results of research of force interaction with various soil surfaces for a loaded UGV and for a group of UGVs. To ensure the reliable motion of a loaded wheel-based UGV over soil or the movement of two or more robots carrying a common cargo it is essential to analyze forces acting on the robot's wheel from the ground. The interaction with the soil of a robot with a hinged load was considered through the wheel system as the interaction of a loaded wheel with a soil. The peculiarities of the motion of a loaded UGV in the previously performed studies of automobile design field were taken into account. Basing on the analysis of different approaches to understand the nature of forces acting on the loaded mobile robot, the choice of forces was considered. The force of the wheel-ground cohesion is considered to be a physical force. The components of this force are projections on the coordinate axes. Motion of the robot is caused only by external applied forces. System of forces includes traction, weight, rolling friction, sliding friction, grip of the wheel with the ground, external forces. Because of unknown terrain along which moves the loaded robot, it is also necessary to include an additional unit in the control system, providing compensation of the initial torque to the initial position of the cargo regarding the robot's hull. Results of force interaction simulation of a loaded robot with various types of soil are presented.

Keywords: loaded mobile robot, soil, terrain, force interaction, force system, features of motion, slippage

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 16-29-04199 ofr_i.

For citation:

Gradetskiy V. G., Ermolov I. L., Knyazkov M. M., Semenov E. A., Sukhanov A. N. Force Interaction between Soil and Loaded UGV,

Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 819–824.

DOI: 10.17587/mau.18.819-824

References

1. Zielinska T., Chmielniak A. Synthesis of Control Law Considering Wheel-Ground Interaction and Contact Stability, *Proceed. of Twelfth Int. Conf. of Climbing and Working Robots. CLAWAR-2012 Turkey*, 9–11 Nov. 2012, Mobile Robotics: Solutions and Challenges, World Scientific, 2012, pp. 1039–1046.
2. Okada T., Tezuka S., Wada H. Smooth Walk of a Skid-Steering Vehicle Consisting of Feet Jointed to Each Wheel RIM, *Proceed. of CLAWAR-2015 Conf.*, USA, 23–26 July, 2015, Adaptive Mobile Robotics, pp. 585–594.
3. Vol'skaya N. S. *Ocenka prohodimosti kolesnyh mashin pri dvizhenii po nerovnoj gruntovoy poverhnosti* (Passability evaluation for wheeled vehicles moving on rough terrain), Moscow, MGIU, 2007, 215 p. (in Russian).
4. Ishlinskij A. Yu. *Mekhanika. Idei, zadachi, prilozheniya* (Mechanics. Ideas, tasks, applications), Moscow, Nauka, 1985, 624 p. (in Russian).
5. Vahlamov V. K. *Konstrukciya, raschet i ehkspluatatsionnye svoystva avtomobilej* (Design, analysis and operational properties of cars), Moscow, Akademiya, 2007, 560 p. (in Russian).
6. Muro T., O'Brien J. *Terramechanics, Land Locomotion Mechanics*, Tokyo, A. A. Balkema Publishers, 2004.
7. Ishlinskij A. Yu. *Trenie kacheniya. Prikladnaya matematika i mekhanika* (The rolling friction. Applied mathematics and mechanics), 1938, vol. 2, iss. 2, pp. 245–260 (in Russian).
8. Agejkin Ya. S. *Prohodimost' avtomobilej* (Passability of cars), Moscow, Mashinostroenie, 1981, 232 p. (in Russian).
9. Bekker M. G. *Vvedenie v teoriyu sistem "mestnost'-mashina"* (Introduction to the theory of "terrain-vehicle" systems), Ed. by V. V. Gus'kova, Moscow, Mashinostroenie, 1973, 520 p. (in Russian).
10. Gradeckij V. G., Ermolov I. L., Knyaz'kov M. M., Semenov E. A., Sobol'nikov S. A., Suhanov A. N. *O nauchnyh zadachah vypolneniya transportnyh operacij gruppoj mobil'nyh robotov* (On the scientific tasks for the transport operations for group of mobile robots), *Robototekhnika i Tekhnicheskaya Kibernetika*, 2016, no. 3, pp. 57–62 (in Russian).

УДК 004.9

DOI: 10.17587/mau.18.824-828

С. Ф. Сергеев, д-р психол. наук, проф., sspost@mail.ru,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Методологический базис проектирования симбиотических сред тренажеров мехатронных и робототехнических систем¹

Рассматриваются вопросы методологии проектирования обучающих сред сетевых тренажеров, включающих симбиотические формы взаимоориентации, взаимодополнения и взаимодействия систем естественного и искусственного интеллекта для подготовки операторов мехатронных и робототехнических систем.

Ключевые слова: обучающая среда, обучающая ориентация, симбиотические формы интеллектуальных объединений

Проблема обеспечения эффективной профессиональной подготовки операторов робототехнических и мехатронных систем, действующих в условиях супервайзерского, дистанционного и непосредственного управления с использованием систем интерфейса на базе виртуальной, дополненной и индуцированной реальности, по настоящее время не теряет своей актуальности и имеет самостоятельное значение, несмотря на широкое внедрение тренажеров и технологий компьютерного обучения [1]. Ранее ожидалось, что роль человека в сложных системах будет непрерывно снижаться в связи с переходом к автоматическому и автономному управлению. Однако данные прогнозы не оправдались. Более того, наблюдается парадоксально интенсивное включение человека в различные формы ориентирующей и управляющей коммуникации, возникающей в системах управления роботами и в интеллектуальных эргатических средах [2]. Появилась необходимость в обучении операторов принятию и реализации решений,

групповым и коллективным видам деятельности в симбиозе со сложными техногенными средами, наделенными искусственным интеллектом. Возникли новые виды учебной деятельности, связанные с постановкой задач и созданием целевых установок интеллектуальным агентам автоматических систем, а также с формированием и управлением миссиями роботов и систем с высокой степенью автономности. Это, в частности, задачи, связанные с супервайзерским управлением, требующие развития эффективных форм коммуникации машины и человека. Можно сказать, что в настоящее время тренажерное обучение объединяется с информационным изучением профессиональной среды, включением в нее, получением и применением знаний. Отметим также, что деятельность операторов робототехнических систем протекает в режиме реального времени и ошибки оператора на любых этапах ее осуществления могут привести к невыполнению задачи.

Интеллектуализация техногенной среды жизнедеятельности человечества сопровождается появлением технологий моделирования практически всех аспектов профессионального и учебного опыта, что снимает технологическую компоненту проблемы подбора в тренажерах, длительное время считавшуюся основной при создании средств профессиональной подготовки операторов сложных

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № 25.8444.2017/БЧ по проекту "Инженерно-психологическое проектирование тренажеров и обучающих систем на базе симбиотических полимодальных техногенных сред" и поддержана грантом РФФИ (проект 16-08-00313).

технических комплексов. Однако оказалось, что практика обучения и тренировки в высокоточных моделях деятельности не имеет серьезных научно-методического и методологического оснований и в целом малоэффективна в силу эффекта информационной перегрузки, сопровождающего процесса восприятия курсантом сложных алгоритмов управления [3, 4]. Проблемы использования высокоточных имитационных моделей в целях обучения связаны с устойчиво повторяемыми мифами и стереотипами, согласно которым тренажер и методики обучения на нем должны создаваться раздельно. Ответственность за результаты обучения возлагается на инструкторско-преподавательский состав центров подготовки, который и является автором методов обучения и контроля. Отметим слабую разработанность проблемы информационного обучения в сложноорганизованных средах, что ведет к возрождению технологий программированного обучения, отвергнутых еще в шестидесятые годы прошлого столетия. Вопросам методологии создания обучающих сред тренажеров операторов сложных систем, создающих симбиотическую интерактивную интеллектуальную среду [5], посвящено настоящее исследование.

Классическая педагогика в обучающих системах и тренажерах

Обучение в рамках традиционных представлений классической профессиональной подготовки рассматривается как активные информационно-деятельностное и коммуникационное взаимодействие двух систем — учителя и ученика, осуществляемые через усвоение и сознательную интерпретацию учебного содержания (В. А. Бодров, В. Ф. Венда, Т. В. Габай, В. В. Давыдов, А. М. Зимичев, А. Н. Печников, К. К. Платонов, В. В. Чебышева, В. Д. Шадриков и др.). Один из участников процесса обучения (инструктор) является активным источником и интерпретатором знаний (структурированной информации), а другой (ученик) — их потребителем, в известной мере пассивным элементом. В силу этого все методы обучения направлены на постановку учебных задач с последующим их решением в моделирующих средах, содержащих существенные элементы и алгоритмы реальной деятельности. Коррекция обучающей процедуры ведется с помощью контрольных вопросов и экзаменационных заданий, свидетельствующих о степени усвоения программы подготовки. Такая организация учебного процесса лежит в основе всех существующих методов электронного и тренажерного обучения и описывается простым дидактическим треугольником, включающим ученика, учителя и учебное содержание [3]. Она вполне работоспособна при подготовке операторов деятельности в простых, алгоритмически управляемых системах, но не эффективна в сложных эргатических и робототехнических комплексах, содержащих мультиагентные компоненты [6, 7]. Господствующие у разработчи-

ков учебно-тренировочных средств представления об обучении как форме переноса знаний и формирования навыков и умений в сложных средах малоэффективны, так как деятельность в них плохо поддается алгоритмизации и структурированию. В результате профессиональный опыт инструктора не может быть передан курсанту. Ведущее значение в классическом тренажерном обучении приобретает индивидуальный опыт ученика, получаемый в результате многократного повторения элементов профессиональной деятельности в среде обучения.

Сложные системы, предоставляя широкое поле деятельности оператору, требуют от него своевременного реагирования на случайные и уникальные события, ведущие к аварийным и нестандартным ситуациям. В групповой операторской деятельности возникает особая форма самоорганизующейся коммуникации, формирующая управляющий дискурс, являющийся элементом культуры эргатической системы. Эти свойства сложных систем не учитываются в классическом тренажерном обучении, но являются определяющими при подготовке операторов и пользователей роботами и мехатронными системами. Выходом из сложившегося положения стал переход к моделям средоориентированного обучения [4].

Обучение в искусственных средах обучения

Развитие технологий моделирования привело в последнее десятилетие к широкому распространению в тренажеростроении методологии и технологии средоориентированного обучения, в частности ее классического варианта, постулирующего особую роль подобия моделей деятельности, формируемых в тренажере реальной деятельности (Г. Л. Коротеев, В. М. Лискин, А. И. Нафтульев, Г. Г. Себряков, С. Ф. Сергеев, В. Н. Соколов, В. Е. Шукшунов). С точки зрения педагогики и психологии обучение в среде является вариантом метода проб и ошибок, перенесенного в сложные виды деятельности. Однако классический вариант средового обучения преувеличивает значение внешних средств деятельности, оставляя в тени внутренние психологические детерминанты и особенности формирования профессионала. В результате страдает качество обучения, появляются внутренне неэффективные структуры знания. Проявляется "эффект дилетанта", резко суживающий диапазон эффективной деятельности. Можно сказать, что классическое средоориентированное обучение массово порождает профессионалов среднего уровня. Однако именно классический подход в тренажеростроении показал свою эффективность при массовой подготовке операторов комплексов управляемого вооружения, летчиков, космонавтов, водителей грузового и пассажирского транспорта и других видов деятельности, требующих для своего выполнения наличия высокоавтоматизированных сенсомоторных навыков. Исключение здесь представляют тренажеры для обучения экипажей атомных подводных лодок,

подготовки операторов энергетических систем, атомных и тепловых электростанций, специфика профессиональной деятельности которых требует достижения целей путем выполнения сложных алгоритмических операций одновременно с принятием управляющих решений в условиях внутригрупповой коммуникации и дефицита времени (А. Н. Анохин, С. И. Магид, В. П. Третьяков). Здесь получили распространение модели обучения, сочетающие поэтапную отработку навыков выполнения отдельных технологических операций с работой на комплексных тренажерах с высокой точностью имитации.

Общим недостатком всех средоориентированных систем обучения является их пассивность и отсутствие механизмов обобщения и фиксации положительного учебного опыта. Выходом из сложившегося положения может стать сетевой подход к созданию среды обучения. Он позволяет объединять имеющиеся и возникающие при обучении в среде учебные ресурсы. Заметим, что в сетевых обучающих системах мехатронных и робототехнических систем нарушается классический дидактический треугольник, порождающий циклы обучающей коммуникации. Возникает распределенный в среде искусственный интеллект, вступающий в симбиотические отношения с акторами сети, в том числе искусственной природы. И тот и другой участники сетевой обучающей координации могут быть машиной или человеком или оба люди или оба машины. Активные элементы среды могут быть также разной природы. Все акторы в процессе обучения накапливают или используют знания для порождения нового знания или распределения существующего знания по носителям, обладающим разным уровнем знаний. В этом суть сетевого обучения — распределение знаний в обучающей среде. Заметим, что классическое обучение не создает нового знания, хотя в процессе распределения знания могут возникать элементы нового.

Создание систем обучения для подготовки пользователей и операторов сложных робототехнических систем с искусственным интеллектом потребовало новой, постнеклассической средоориентированной эргономики тренажеростроения. Меняются ориентиры при обучении в среде, делается акцент на внутреннюю активность обучаемого, формирование механизмов самоорганизации ментальных структур профессионала, действующего в виртуальном мире среды обучения [8, 9]. Основные тезисы постулативной схемы данного направления:

- различаются понятия "обучающая среда" и "среда обучения", при этом модель деятельности и технологии ее создания (среда обучения) отделяется от методических психолого-педагогических принципов формирования когнитивно-ментальных структур обучаемого (обучающая среда);
- обучающая среда обучающей системы (тренажера) рассматривается как продукт активной конструирующей деятельности человека-оператора

и не может быть рассмотрена вне его психического содержания;

- обучающая среда отражает феномен динамической целостности циклически формирующихся цепей отношений человека с физической и социальной профессиональной реальностью. Среда обучения выступает перед субъектом одновременно в виде субъективной реальности (воспринимаемый мир) и как внешний предметный мир, в котором действует субъект (интерпретируемый мир);
- обучающая среда в содержательном плане возникает как динамический процесс избирательного формирования сетей отношений субъектов обучения, в которые ими лично (не всегда осознанно) вовлекаются самые разнообразные элементы внешнего окружения и внутреннего содержания среды обучения с целью обеспечить аутопозис организма, стабильность личности и непрерывность ее истории.

Обучающие среды сетевой обучающей системы должны включать взаимодополняющие симбиотические формы взаимодействия интеллекта, распределенного в технических элементах сети с интеллектом акторов [7].

Отметим изменение парадигмы обучения в среде, связанное с развитием неклассических взглядов на психику человека, в соответствии с которыми обучение представляет собой циклический эволюционный процесс, содержащий психофизиологический и личностный компоненты. В сущности, можно говорить о том, что процессы, ведущие к обучению, связаны с механизмами самоорганизации психики и мозга. Это придает особый смысл обеспечению процессов интерфейсной связи и ориентации ученика в зоне учебных смыслов вместо навязывания нужных форм поведения, принятого в классическом тренажерном обучении [10, 11].

Среди классиков отечественной психологии и дидактики обучения следует отметить Н. Ф. Талызину и П. Я. Гальперина, работы которых связаны с теорией поэтапного формирования умственных действий и навыков. В данной теории развиваются идеи о принципиальной общности внутренней психической и внешней физической деятельности человека. Умственное развитие человека и усвоение знаний и умений, по мнению авторов, происходят путем интериоризации, переходом внешней деятельности во внутренний умственный план. Декларируется наличие этапов усвоения учебного опыта от ознакомления с действием, ориентировкой, мотивацией до автоматизированного действия. Основной проблемой данного подхода является попытка управления обучением на основе формальной теоретической схемы, которую трудно применить в конкретных условиях тренажерного обучения, формирующего не только навыки, но и эффективные профессиональные понятийные схемы. Идеи Талызиной и Гальперина на новом научно-методологическом базисе, на наш взгляд, могут быть развиты на основе исследований А. Клер-

манса (A. Cleeremans), который, обосновывая тезис "радикальной пластичности", пришел к выводу, что сознательное и бессознательное познания коренятся в одном и том же наборе взаимодействующих механизмов репрезентативных систем, а следовательно, могут формироваться похожими методами, в том числе и без привлечения ресурсов сознания. Однако определить скрытое знание не представляется возможным по методическим причинам. Ставится проблема эксплицитного и имплицитного знания. Эксплицитное знание относится к сознательному опыту субъекта и может быть выражено им в терминах сознательного опыта с использованием терминов "видеть", "помнить", "понимать". Имплицитное знание, напротив, обнаруживается при выполнении заданий без всякого осознания факта его применения. Оно проявляется без участия внимания и обнаруживается в опосредованной косвенной форме. Термины "эксплицитный" и "имплицитный" близки по значению терминами "сознательный" и "бессознательный", и в силу этого могут быть взаимозаменяемы. Принятие положений рассматриваемой концепции добавляет к концепции поэтапного формирования умственных действий стадии формирования имплицитного знания.

Симбиотическое средоориентированное обучение

Для выделения эффективных алгоритмов обучения, возникающих в среде обучения в процессе индивидуального и комбинированного группового обучения в сложных симбиотических средах, целесообразно использование технологий машинного обучения, включающих статистические методы для решения задач регрессии и классификации с множественными переменными. Наиболее часто используемыми являются метод опорных векторов (*Support Vector Machines, SVM*) для решения задач классификации и регрессии и метод байесовской классификации. Благодаря возможности использования различных комбинаций при построении пространства признаков, в котором строятся границы решения, метод опорных векторов обладает высокой степенью гибкости при решении задач регрессии и классификации различного уровня сложности. Это позволяет выделять учебные процедуры с задаваемыми обучающими характеристиками по отношению к заданным векторам признаков и включать их в следующие обучающие итерации в циклах подготовки. В данном контексте целесообразно в историю обучения операторов робототехнических и мехатронных систем включать показатели эффективности, что позволяет выделить эффективные области и процедуры для использования в качестве образцов.

Основные проблемы обучения в сложных технологических средах связаны с принятой в тренажерной подготовке методологией модульного практико-ориентированного обучения, ведущего к "клипованному сознанию" учеников и алгоритмическим

формам решения проблем. Возникающий в процессе такого обучения опыт не позволяет решать сложные задачи, требующие нетривиальных решений.

Эффективное обучение работе в сложных системах предполагает создание активной интерактивной среды, включающей взаимодействие искусственного интеллекта, создающего насыщенные ассоциативные поля вокруг основных понятий и алгоритмов изучаемой профессиональной деятельности, с интеллектом пользователей. Необходимо ведение записи полной истории обучения и функционирования всех операторов и условий применения конкретной робототехнической системы. Получаемые данные должны быть подвергнуты анализу для получения условий эффективного применения и использования опыта системы в обучении. Обучение необходимо рассматривать как элемент поддержки и обеспечения цикла функционирования оператора в процессе его профессиональной деятельности (изменения его эффективности в силу естественных условий, забывания, утери навыков и т. д.).

Интеллектуализация обучающих и тренирующих сред при подготовке операторов робототехнических систем служит повышению эффективности управления за счет симбиоза человека с интеллектуальными агентами среды.

Список литературы

1. **Сергеев С. Ф.** Человеческий фактор в отечественной робототехнике: основные проблемы и перспективы развития // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. № 3 (12). С. 10—13.
2. **Печников А. Н.** Теоретические основы психолого-педагогического проектирования автоматизированных обучающих систем. Петродворец: ВВМУРЭ им. А. С. Попова, 1995. 332 с.
3. **Сергеев С. Ф.** Еще раз про E-Learning дидактику: острые углы методологического круга // Образовательные технологии и общество (Educational Technology & Society). 2015. Т. 18. № 1. С. 589—599. URL: http://ifets.ieee.org/russian/depositary/v18_i1/pdf/19.pdf (дата обращения: 24.03.2015).
4. **Сергеев С. Ф.** Методологические основы проектирования обучающих сред // Авиакосмическое приборостроение. 2006. № 2. 2006. С. 50—56.
5. **Сергеев С. Ф.** Интеллектуальные симбионты в эргатических системах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2 (84). С. 149—154.
6. **Теряев Е. Д., Петрин К. В., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Агентные технологии в автоматизированных информационно-управляющих системах. Ч. 1. Основы агентного подхода // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 7. С. 11—20.
7. **Теряев Е. Д., Петрин К. В., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Агентные технологии в автоматизированных информационно-управляющих системах. Ч. 2. Агентные режимы в задачах контроля и управления подхода // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 10. С. 11—21.
8. **Сергеев С. Ф.** Виртуальные тренажеры: проблемы теории и методологии проектирования // Биотехносфера. 2010. № 2 (8). С. 15—20.
9. **Сергеев С. Ф.** Методология проектирования тренажеров с иммерсивными обучающими средами // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 1 (71). С. 109—114.
10. **Сергеев С. Ф.** Психологические аспекты проблемы интерфейса в техногенном мире // Психологический журнал. 2014. Т. 35. № 5. С. 88—98.
11. **Сергеев С. Ф.** Системно-психологические аспекты автоматизации и роботизации техногенных сред // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 11. С. 751—751.

Methodological Basis of Symbiotic Design Environments Simulators for Mechatronic and Robotic Systems

S. F. Sergeev, sspost@mail.ru, Saint Petersburg Polytechnic University Peter the Great,
Russian Federation, Saint Petersburg

Corresponding author: **Sergeev Sergei F.**, Dr. of psychology Sciences, Professor,
Saint Petersburg Polytechnic University Peter the Great, Russian Federation, Saint Petersburg,
e-mail: sspost@mail.ru

Accepted on September 15, 2017

The article is devoted to the methodology of designing simulators for operators of complex systems that create a symbiotic interactive intellectual environment. The problem of professional training of operators of robotic and mechatronic systems operating in the conditions of supervisor, remote and direct control using an interface based on virtual, supplemented and induced reality is relevant and of independent importance, despite the widespread use of simulators simulating the real-world environment. There were new types of professional and educational activities related to the setting of tasks and the creation of target installations for intelligent agents of automatic systems, the formation and management of missions of robots and mechatronic systems. Simulative training integrates with the cognitive study of the professional environment, including in it, the acquisition and application of knowledge. Complex robotic systems, providing a wide field of activity to the operator, require him to respond in a timely manner to random and unique events leading to emergency and non-standard situations. In the group of operator activity there is a special form of self-organizing communication that forms the governing discourse of the ergatic system. These properties of complex systems are not taken into account in classical simulator training, but are crucial when preparing operators and users of robots and mechatronic systems. The way out of this situation was the transition to a non-classical version of environment-oriented learning. The main features of this conceptual scheme and prospects for its development within the framework of constructivism and the theory of step-by-step formation of mental actions are considered in the article. The problems of increasing the training efficiency of operators of robotic systems are considered, due to the intellectualization of training and training environments. It is supposed to create an active interactive environment involving the interaction of the artificial intelligence of the learning environment that creates rich associative fields around the basic concepts and algorithms of the studied professional activity with the intellect of the trainees. It is advisable to keep a record of the complete history of the training and operation of all operators and the conditions for the application of a particular robotic system. Training is considered as an element of support and maintenance of autopoietic cycles of functioning and development of the operator in the process of intelligent symbiosis.

Keywords: teaching environment, teaching orientation, symbiotic forms of intellectual associations

For citation:

Sergeev S. F. Methodological Basis of Symbiotic Design Environments Simulators for Mechatronic and Robotic Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 824–828.

DOI: 10.17587/mau.18.824-828

References

1. **Sergeev S. F.** *Chelovecheskij faktor v otechestvennoj robototekhnike: osnovnye problemy i perspektivy razvitiya* (The human factor in domestic robotics: basic problems and prospects of development), *Robototekhnika i tekhnicheskaja kibernetika*, 2016, no. 3 (12), pp. 10–13 (in Russian).
2. **Pechnikov A. N.** *Teoreticheskie osnovy psihologo-pedagogicheskogo proektirovaniya avtomatizirovannykh obuchajushhih sistem* (The theoretical basis of psycho-pedagogical design of an automated training system), Petrodvorec, VVMURJe im. A. S. Popova, 1995, 332 p. (in Russian).
3. **Sergeev S. F.** *Eshhe raz pro E-Learning didaktiku: ostrye ugly metodologicheskogo kruga* (Once again about E-Learning didactics: sharp corners methodological circle), *Obrazovatel'nye tekhnologii i obshchestvo* (Educational Technology & Society), 2015, vol. 18, no. 1, pp. 589–599, available at: http://ifets.ieee.org/russian/depositary/v18_i1/pdf/19.pdf (date of access 24.03.2015) (in Russian).
4. **Sergeev S. F.** *Metodologicheskie osnovy proektirovaniya obuchajushhih sred* (The methodological basis for designing training environments), *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2006, no. 2, pp. 50–56 (in Russian).
5. **Sergeev S. F.** *Intellektnye simbioty v jergaticheskikh sistemah* (Intelligent symbionts in ergatic systems), *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnykh tekhnologij, mehaniki i optiki*, 2013, no. 2 (84), pp. 149–154 (in Russian).
6. **Terjaev E. D., Petrin K. V., Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *Agentnye tekhnologii v avtomatizirovannykh informacionno-upravljajushih sistemah. Ch. I. Osnovy agentnogo podhoda* (Agent technologies in automated management information systems. Part I. Foundations of agent-based approach), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 7, pp. 11–20 (in Russian).
7. **Terjaev E. D., Petrin K. V., Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *Agentnye tekhnologii v avtomatizirovannykh informacionno-upravljajushih sistemah. Ch. II. Agentnye rezhimy v zadachah kontrolja i upravlenija podhoda* (Agent technologies in automated management information systems. Part II. Agent-based modes in problems of control and management approach), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 10, pp. 11–21 (in Russian).
8. **Sergeev S. F.** *Virtual'nye trenazhery: problemy teorii i metodologii proektirovaniya* (Virtual simulators: problems of theory and design methodology), *Biotehnosfera*, 2010, no. 2 (8), pp. 15–20 (in Russian).
9. **Sergeev S. F.** *Metodologija proektirovaniya trenazhgorov s immersivnymi obuchajushhimi sredami* (Methodology of design of training simulators with an immersive learning environments), *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnykh tekhnologij, mehaniki i optiki*, 2011, no. 1 (71), pp. 109–114 (in Russian).
10. **Sergeev S. F.** *Psihologicheskie aspekty problemy interfejsa v tehnogenom mire* (Psychological aspects of interface problems in man-made world), *Psihologicheskij zhurnal*, 2014, vol. 35, no. 5, pp. 88–98 (in Russian).
11. **Sergeev S. F.** *Sistemno-psihologicheskie aspekty avtomatizacii i robotizacii tehnogenykh sred* (The system-psychological aspects of automation and robotization of technological environments), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 11, pp. 751–756 (in Russian).

В. И. Городецкий, проф., гл. науч. сотр., gor@iias.spb.su,
О. Л. Бухвалов, мл. науч. сотр., psychoveter@gmail.com,
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

Самоорганизующиеся производственные В2В-сети. Часть 2. Архитектура и алгоритмическая поддержка^{1, 2}

Рассматривается сетевая модель ведения распределенного бизнеса, которая является в настоящее время одной из базовых моделей цифровой экономики на уровне управления производством. Даны постановки основных прикладных задач управления производством в концепции В2В-сети, рассмотрено базовое множество задач программно-коммуникационной инфраструктуры, поддерживающей самоорганизующийся стиль работы открытой производственной В2В-сети и распределенную координацию процессов управления производством. Предложены варианты решений перечисленных задач и показана практическая реализуемость концепции В2В-сети производственных предприятий уже в настоящее время.

Ключевые слова: В2В-сети, многоагентная архитектура, самоорганизация, распределенная координация, программно-коммуникационная инфраструктура, планирование, составление расписаний

Введение

Обычно В2В-сетями называют вид экономического и информационного взаимодействия предприятий, компаний или организаций иного типа (например, виртуальных предприятий, распределенных производств, распределенных транспортных компаний и др.), имеющий целью координацию распределенного выполнения общих бизнес-процессов *в интересах самого бизнеса*. В данной работе рассматриваются самоорганизующиеся производственные В2В-сети.

В первой части работы проанализировано текущее состояние исследований и разработок в этой области, сформулированы ее ключевые проблемы и вызовы, предложена концепция реализации парадигмы производственной В2В-сети как самоорганизующейся открытой сети предприятий, построенной на основе метафоры многоагентных систем. В ней были содержательно сформулированы базовые прикладные задачи, которые должны решаться в сети для реализации функций распределенного управления производственными процессами, а также функции программно-коммуникационной инфраструктуры, предназначенной для поддержки распределенного взаимодействия компонент управления производством, обеспечения ее открытости и реализации самоорганизующегося стиля функционирования. В данной части работы рассматривается алгоритмическая поддержка перечисленных задач (разделы 1 и 2, а также общая

архитектура организации программного обеспечения В2В производственной сети (раздел 3). В заключении формулируются общие выводы по результатам работы и подчеркивается важная роль концепции В2В-сети как парадигмы организации распределенного производства в ближайшем будущем.

Основные прикладные задачи, решаемые в узлах В2В-сети и на сетевом уровне, включают в себя планирование выполнения заказов, составление локальных расписаний исполнения заказов в узлах сети и распределенную координацию локальных расписаний для тех заказов, которые выполняются в нескольких узлах. Содержание прикладных задач и алгоритмы их решения во многом определяют требования к составу задач инфраструктурной компоненты программного обеспечения В2В-сети. Далее конкретизируются постановки названных прикладных задач управления и задач инфраструктурной компоненты, а также даются описания алгоритмов их решения.

1. Базовые алгоритмы для прикладных задач производственной В2В-сети

1.1. Постановка и алгоритм решения задачи планирования выполнения заказов

В постановке этой задачи предполагается, что каждый заказ или его часть ("подзаказ"), подлежащая исполнению в конкретном цехе, заданы частично упорядоченным множеством операций, которые при планировании на уровне цеха не могут подвергаться дальнейшей декомпозиции.

В случае открытой В2В-сети исполнителем любой части заказа может стать любой узел сети, обладающий необходимыми компетенциями и ресурсами. Полагается, что каждый узел (предприятие

¹ Данная работа выполнена в рамках исследований по проекту № 0073-2015-0003 бюджетной тематики СПИИРАН и по проекту № 214 Программы Президиума РАН I.5П.

² Первая часть статьи опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", 2017, Т. 18, № 11.

сети), анализируя возможность выполнения некоторого заказа или его части, автономно оценивает достаточность своих компетенций и ресурсов, а также возможность их использования в требуемом интервале времени. Предполагается также, что каждый потенциальный исполнитель заказа/подзаказа адекватно оценивает свои возможности по реализации тех или иных функций и является добросовестным участником B2B-сети, а все последующие отклонения от заявленных возможностей, нарушения требований по качеству и срокам исполнения заказов обусловлены случайными возмущениями, которые не зависят от воли участников B2B-сети. Другими словами, в постановке задачи не рассматриваются риски, связанные с возможной недобросовестностью исполнителей заказов.

Каждый узел сети обладает ограниченным набором технологических способностей по производству продуктов и/или по предоставляемому им множеству сервисов. Он также имеет ограниченные свободные ресурсы, которые могут быть привлечены к выполнению заказов в требуемый период времени. Другие предположения постановки задачи планирования заказов таковы:

- заказы могут поступать в любой узел B2B-сети или быть им инициированы. Узел, который инициировал заказ, или узел, в который заказ поступил извне, инициализирует и реализует процесс планирования его исполнения;
- планирование исполнения заказов выполняется в реальном времени, причем на фоне уже существующей загрузки узлов и в динамике поступления заказов;
- узлы сети являются равноправным, т.е. потенциальные заказчики имеют одинаковый доступ ко всем потенциальным исполнителям, а все исполнители могут участвовать в исполнении заказов в соответствии со своими компетенциями и наличными ресурсами;
- планирование выполняется в распределенном варианте, централизация планирования и координации исполнения заказов не используются³;
- инфраструктура B2B-сети должна быть способна выполнять поиск требуемых сервисов и исполнителей с помощью распределенных механизмов белых и желтых страниц [12, 13] (см также далее);
- конфиденциальная информация узлов сети о технологиях, которыми они владеют, о ресурсах, которыми они располагают, и о загруженности их другими заказами должна быть недоступна другим узлам и потому не может использоваться протоколом распределенного планирования;

³ Это требование является достаточно жестким и не всегда адекватно практике. Но оно здесь вводится как особенность постановки задачи. На практике задача может быть проще, если для отдельных подзадач допускается централизованный вариант. Это, например, может относиться к белым и желтым страницам агентской платформы и компонентам единой информационной среды предприятия, если модель B2B-сети масштабируется на уровень отдельного предприятия.

- качество плана выполнения заказа определяется степенью соблюдения директивных сроков его выполнения, а также платой за выполнение заказа, которую предприятие получает от заказчика.

Результатом работы механизма распределенного планирования является назначение заказов или их частей конкретным исполнителям. Заданный частичный порядок на множестве операций заказа нарушаться не может, поскольку он определяется технологической картой исполнения заказа. Заметим, что в процессе оперативного управления распределенным исполнением заказов узлы сети должны быть обеспечены еще некоторой дополнительной информацией, необходимой для поддержания их ситуационной осведомленности в целях временной синхронизации процессов исполнения заказа в соответствии с заданным частичным порядком на множестве его операций. Для каждого заказа указываются также временные рамки его исполнения, т.е. самое раннее допустимое время начала исполнения заказа и директивный срок его исполнения.

Для решения описанной задачи распределенного планирования заказов используется стандартный *рыночный механизм* самоорганизации [1, 2], в основе которого лежит модель аукциона. В этой модели в конкретной сессии аукциона любой участник рынка играет либо роль *покупателя* товара (в конкретных приложениях товаром могут быть задачи, станки производственной системы, сервисы, ресурсы и т.п.), либо роль *продавца* (владельца ресурса), причем оба они действуют только в своих интересах. Вторым важным компонентом модели аукциона является явно описанный механизм установления соответствия ("мэтчинга") владельцев и потребителей ресурсов, представляющих интерес друг для друга в рамках возможной "сделки".

В сессии аукциона узлы B2B-сети взаимодействуют локально с помощью обмена сообщениями, которые содержат *предложения, сделки, обязательства и платежи* за ресурсы. Аукционер, выступающий от имени заказчика (в этой роли выступает узел сети, ответственный за планирование заказа), готов заплатить исполнителю заказа или его части определенную цену в пределах некоторого бюджета, и его цель — заплатить как можно меньше. Узлы сети, обладающие необходимыми компетенциями и свободными ресурсами для исполнения заказа, которые заинтересованы в его получении, наоборот, имеют целью максимизировать свой доход. Они решают сами, участвовать ли им в торгах за заказ и на какую минимальную плату за его исполнение они согласны.

В описанной стратегии самоорганизации каждый участник аукциона имеет свою максимальную/минимальную цену, которая неизвестна другим узлам, и при этом покупатель не может платить больше установленной им максимальной цены, а продавец не может продавать ресурс за меньшую цену, чем им выбрана. Торги строятся

так, чтобы в их процессе обе цены эволюционировали по направлению к рыночной цене [3–6].

Таким образом, общая идея механизма распределенного планирования выполнения множества заказов и их частей в В2В-сети сводится к проведению множества *локальных аукционов* по множеству заказов/подзаказов на динамически формируемом *локальном множестве узлов* сети, которые рассматриваются как потенциальные исполнители соответствующих заказов/подзаказов. Алгоритмическая сторона этой модели формализуется в терминах соответствующих *протоколов*. В экспериментальной разработке для этих целей использовался простейший частный случай аукциона, который реализуется протоколом контрактных сетей [7]. Его описание дается в следующем подразделе. В области многоагентных систем он имеет стандартную реализацию [8].

1.2. Постановка и алгоритм решения задачи составления расписаний выполнения заказов

Требования, изложенные в предыдущем подразделе применительно к задаче планирования исполнения заказов, по большей части относятся также и к задаче составления расписания. Важным ограничением и в этом случае остается требование конфиденциальности информации, касающейся технологических, ресурсных и других аспектов узлов В2В-сети. Очевидно, что это ограничение делает неприменимыми все существующие централизованные методы построения расписаний.

Рассмотрим содержание задачи составления расписаний выполнения заказов, назначенных узлам сети на этапе планирования. Этот алгоритм, как он реализуется авторами в экспериментальных разработках по данной тематике [2], можно разделить на две части. Одна из них — это та часть алгоритма, которая выполняется "внутри" каждого узла сети. Она имеет целью построение локального расписания выполнения заказов/частей заказов, которые конкретный узел должен выполнить в соответствии с результатами решения задачи планирования. Эта часть алгоритма, а также те конфиденциальные данные, которые используются им, "не видны" извне. Вторая часть алгоритма имеет целью координацию локальных расписаний узлов в целях обеспечения ограничений, наложенных на заказы. Эти ограничения задают частичный порядок на множестве его частей, исполняемых разными узлами, а также задают допустимые временные рамки выполнения заказа в целом.

Алгоритм координации описывается протоколом взаимодействия узлов. Он реализуется путем обмена сообщениями, имеющими целью согласование локальных расписаний таким образом, чтобы временные ограничения, наложенные на заказ в целом, были бы, по возможности, выполнены. Напомним, что ограничения на частичный порядок, заданный на множестве частей заказа, должен быть выполнен безусловно. Не может также нару-

шаться ограничение на самое раннее время начала выполнения заказа. Что касается директивного срока выполнения заказа, то задержки с выполнением заказа являются объектом минимизации по некоторому показателю, представленному, например, в терминах функции штрафа. Далее содержательно описываются локальные алгоритмы составления расписаний выполнения заказов в узлах сети, а также алгоритм координации локальных расписаний на уровне В2В-сети.

Локальный алгоритм составления расписаний. Рассмотрим сначала формальную постановку задачи составления локального расписания узла В2В-сети. Пусть $[T_0, T_k]$ — интервал времени, для которого составляется расписание работы узла. Обозначим множество заказов узла, подлежащих исполнению в заданном горизонте планирования, $O = \{O_j\}_{j=1}^N$, где O_j — заказ с номером j , а N — общее число заказов, для которых составляются расписания. Напомним, что каждый заказ множества O представлен частично упорядоченным множеством операций. Каждому заказу O_j поставлено в соответствие значение времени $T_0^{(j)}$, раньше которого его исполнение начато быть не может. Заказы, исполнение которых уже было начато до момента времени T_0 , в множество O не включаются. Все остальные заказы участвуют в процессе составления локального расписания на равных правах. Если некоторый ресурс R_i на момент времени T_0 занят выполнением некоторого заказа, то в новом расписании он может быть использован только после того, как освободится. Формально это учитывается индивидуальной диаграммой временной доступности ресурса.

Каждой операции заказа поставлены в соответствие требования к ресурсам, которые необходимы для ее выполнения. В производственных сетях к ресурсам относятся, например, рабочие той или иной квалификации, станочное оборудование, на котором операция может исполняться, материалы, потребные по технологии, и др. Вся информация о ресурсах предприятия обычно бывает представлена в соответствующей справочно-информационной системе, которая является компонентой единого информационного пространства узла сети и которая доступна алгоритмам составления расписаний.

Предполагается, что расписание строится так, чтобы оптимизировать локальный показатель качества или несколько таких показателей в более общем случае. Обычно используются следующие показатели:

- *объем товарной продукции*, которая должна быть произведена в течение календарного месяца; эта величина определяется суммой нормо-часов всех заказов, *завершаемых* в течение текущего месяца;
- *объем валовой продукции*, произведенной в течение календарного месяца; эта величина определяется суммой нормо-часов всех *запланированных* операций.

Достижение заданных объемов товарной и валовой продукции рассматривается в качестве критериев эффективности искомого расписания.

Кроме того, поскольку очень часто бывает невозможно выполнить временные ограничения на сроки выполнения заказов, то в качестве еще одного показателя качества расписания выступает значение некоторой функции штрафа за нарушение этих сроков.

Разработанный алгоритм составления локального расписания исполнения заказов узла строится как итеративная процедура. В ней на каждой итерации:

а) проводится выбор очередной операции, для которой определяется интервал времени выполнения, и

б) находится допустимое время начала ее исполнения и ресурсы, которые будут использованы при ее выполнении.

Очередная операция выбирается из множества операций, все предшественники которых по отношению порядка операций в заказе уже включены в расписание. Выбор очередной операции из этого множества выполняется с помощью некоторой *политики*, содержащей эвристические правила. Выбор конкретного ресурса узла и времени начала исполнения операции выполняется с помощью протокола контрактных сетей [7, 8]. Его стандартная AUML-диаграмма представлена на рис. 1. Детали алгоритма составления локального расписания и разработанные программные версии их реализации описаны в работах [1, 9].

Алгоритм распределенной координации локальных расписаний узлов. В этом алгоритме рассматривается множество узлов B2B-сети $\{Dep_i\}_{i=1}^{N_{Dep}}$ (Dep — от англ. *Department*), совместно выполняющих заказы множества $O = \{O_j\}_{j=1}^N$, из которых, по крайней

мере, некоторое подмножество таково, что в их исполнении участвуют несколько узлов.

Каждому заказу, назначенному для выполнения подмножества узлов B2B-сети, ставятся в соответствие два времени: $\{T_0^{(j)}\}_{j=1}^{N_{Order}}$ — самое раннее время, когда выполнение заказа $O = \{O_j\}_{j=1}^N$ может

быть начато, и $\{T_k^{(j)}\}_{j=1}^{N_{Order}}$ — самый поздний срок, к которому он должен быть выполнен. Подчеркнем, что эти ограничения относятся к заказу в целом, а не к его частям. Они задают интервал календарного времени, в течение которого заказ должен быть выполнен в соответствии с контрактом.

Алгоритм распределенной координации расписаний должен:

1) обеспечить синхронизацию выполнения различных частей заказа, исполняемого несколькими узлами, таким образом, чтобы безусловно выполнялись отношения частичного порядка, заданные на их множестве;

2) по возможности минимизировать задержки выполнения заказов по отношению к директивным временам их исполнения. Действительно, интервал времени исполнения заказа O_j в соответствии с контрактом должен укладываться в интервал $[\{T_0^{(j)}\}_{j=1}^{N_{Order}}, \{T_k^{(j)}\}_{j=1}^{N_{Order}}]$, но каждый локальный алгоритм составления расписаний не имеет информации об этом. По этой причине ответственность за выполнение данного ограничения возлагается на алгоритм координации расписаний.

Базовую идею алгоритма иллюстрирует рис. 2. Дадим его краткое описание. Алгоритм распределенной координации локальных расписаний узлов B2B-сети строится на основе обмена метаданными

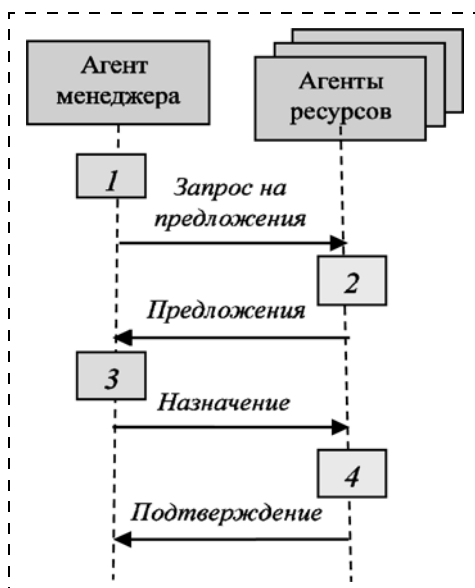


Рис. 1. AUML-диаграмма CNP-протокола

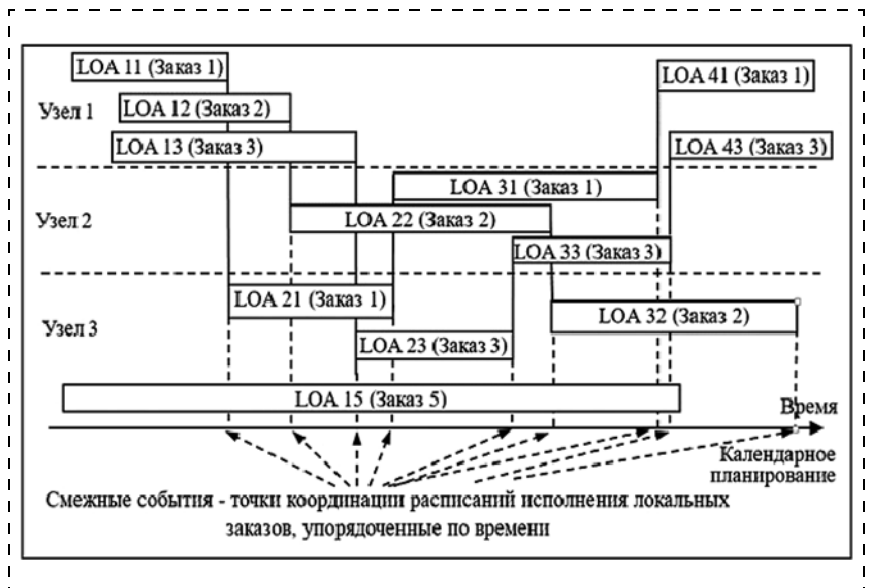


Рис. 2. Пояснение базовой идеи алгоритма распределенной координации. В примере общее число заказов — 5, число узлов — 3

между парой ее узлов, которые выполняют две смежные (по отношению порядка) части одного и того же заказа. Запуск алгоритма распределенной координации (*протокола координации*) осуществляется так называемыми *смежными событиями*⁴. Каждое такое событие генерируется тогда, когда заканчивается составление расписания исполнения части заказа, выполняемой в некотором узле, а продолжение выполнения этого заказа есть функция уже другого узла (или узлов), который ответствен за выполнение смежной (непосредственно следующей) операции заказа для той из операций, которая была инициатором генерации смежного события.

Другое важное понятие алгоритма координации — это понятие *маркера фронта работ*. Обозначим операцию r заказа O_j символом $a_r(O_j)$ (от англ. *activity*). Напомним, что в каждом узле сети в соответствии с локальным расписанием параллельно обычно выполняются несколько операций одного или нескольких заказов. Множество таких операций в локальном расписании на момент времени t называется *фронтом работ узла* в этот момент времени. Соответственно, *маркером фронта работ* называется метка $M(a_r(O_j), t) = M_{r,j}(t)$, которая ставится в соответствие каждой работе $a_r(O_j)$, принадлежащей в момент времени t фронту работ узла.

Понятие смежного события является базовым понятием алгоритма распределенной координации, поскольку оно реализует его операционную семантику. Каждый раз, когда генерируется смежное событие, управление процессом исполнения заказа передается алгоритму координации расписаний. Координация выполняется путем переговоров двух узлов: узла сети, в котором завершилось выполнение порученной ему части заказа (обозначим его N^-), и узла, в котором выполнение заказа должно быть продолжено (обозначим его N^+).

Смежное событие $E_{r,j}(N^-, N^+, t)$, сгенерированное узлом сети N^- , содержит в качестве аргумента имя узла N^+ , которому должна быть сообщена информация об окончании выполнения соответствующей части заказа O_j в узле N^- . Узел N^+ должен продолжить его выполнение. Заметим, что в общем случае таких узлов может быть несколько, и тогда смежное событие содержит в качестве аргументов имена всех таких узлов. В частном случае последователя для сгенерированного смежного события может и не быть, если операция, инициировавшая смежное событие, является последней в заказе O_j . Таким образом, с каждым смежным событием $E_{r,j}(N^-, N^+, t)$ связано два факта, существенных для того узла (узлов), в котором (которых) должно продолжаться выполнение заказа:

(а) окончание предшествующей операции и

⁴ *Смежные события*, наряду с *маркерами*, о которых речь идет чуть ниже, являются компонентами информации, которой обмениваются агенты узлов для поддержания их ситуационной осведомленности, о которой упоминалось ранее.

(б) разрешение включить во фронт работ узла-получателя смежного события N^+ последовательной работы O_j , законченной в узле сети N^- .

Локальный цикл составления расписания продолжается до тех пор, пока имеется хотя бы одна операция, помеченная маркером. В случае, когда таких операций нет, локальный цикл работы алгоритма переходит в режим ожидания и стартует тогда, когда в узле появляются операции, помеченные маркером.

Другими словами, алгоритм организован таким образом, что глобальный фронт планирования (объединение фронтов по множеству узлов сети) продвигается в нем и по временной шкале, и по структурированному множеству операций заказов сети. Когда заканчивается планирование некоторого заказа, в конечном узле выполняются также некоторые заключительные операции.

2. Базовые алгоритмы инфраструктурных задач производственной В2В-сети

Напомним, что под *инфраструктурными задачами* понимается множество задач, которые в В2В-сети необходимо решать для поддержки функций коммуникаций, поиска объектов и сервисов, организации взаимодействия узлов (предприятий) В2В-сети, и другие аналогичные задачи, которые непосредственно не относятся к функциям приложений. Далее кратко рассматриваются постановки и алгоритмы решения этих задач. Заметим, что задача обеспечения безопасности сети здесь не рассматривается.

2.1. Обеспечение коммуникационного сервиса

Физической основой этого сервиса является сеть Интернет. Коммуникационный сервис должен *обеспечивать отправку сообщений* как автономным программным сущностям того же узла, так и сущностям, установленным в других узлах сети, для которых текущий узел является либо адресатом сообщения, либо промежуточным узлом для поиска нужного адресата с помощью некоторого протокола маршрутизации. Этот сервис должен *предоставлять каналы связи* и обеспечивать *адресацию сообщений*. Ввиду предположения об открытости сети, в которой топология и состав узлов могут меняться со временем, эта адресация должна выполняться по протоколу, отличному от протокола *TCP/IP*. В случае, если для адресации сообщений или поиска сервиса по его имени используется р2р-протокол, коммуникационную компоненту, обеспечивающую сервис предоставления каналов связи и адресации сообщений, принято называть *пиром* (от англ. *peer* — одноранговый, равноправный; этот термин подчеркивает горизонтальный характер связи, в отличие от иерархического). Пир должен также исполнять *механизм управления списком своих контактов* в том случае, если в сети изменяется состав узлов. Эта задача решается при из-

менении топологии сети, что может происходить как за счет выхода узлов из сети и входа в нее новых узлов, так и за счет намеренной реконфигурации сети с целью оптимизировать ее топологию⁵.

2.2. Обеспечение открытости сети

Открытость сети обеспечивается, с одной стороны, множеством стандартных протоколов, с помощью которых произвольное предприятие может войти в сеть, объявить о своих сервисах, получить информацию о соседях и их сервисах и стать таким образом равноправным узлом сети. Вместе с тем, открытость сети обеспечивается стандартными протоколами, которым следуют узлы сети, намеревающиеся покинуть сеть. При этом инфраструктура должна обеспечить поддержку связности сети, маршрутизацию сообщений при модификации топологии сети и зафиксировать изменение состава сервисов, доступных в ней. Такая постановка задачи рассматривается в литературе по открытым сетям. Для ее решения могут быть использованы различные принципы.

Один из вариантов — это использование технологии *JXTA* [10], которая является *Java*-реализацией стандарта, разработанного *UPnP*-форумом [11]. Однако к настоящему времени компания *Ogacle*, владелец технологии *JXTA*, остановила работы по ней и поддержку разработок. По этой причине судьба этой технологии в настоящее время неясна, как неясны и перспективы ее использования в самоорганизующихся *B2B*-сетях.

Другой, более поздний вариант возможной реализации механизма открытости сети базируется на рабочем стандарте *FIPA* [12]. Он предлагает использовать распределенную *p2p*-платформу агентов, обеспечивающую типовой механизм *p2p*-взаимодействия в сети, который обеспечивает "полное разъединение связи агента с пиром от прикладного уровня, позволяя их независимую модификацию" [12, 13]. При этом распределенная агентская платформа реализуется как оверлейная (виртуальная) сеть, установленная поверх коммуникационного уровня, представляемого сетью пиров. Аналогично прикладной уровень, образуемый узлами *B2B*-сети, реализуется в этой концепции как оверлейная сеть, установленная, в свою очередь, поверх оверлейной сети экземпляров распределенной агентской платформы. Заметим, что коммуникационный уровень, если он организуется для работы в *p2p*-стиле, также строится как оверлейная сеть, установленная поверх *TCP/IP*-уровня.

Однако существуют и другие возможности поддержки открытости *B2B*-сети, базирующиеся на обмене сообщениями, например акторные систе-

мы, различные реализации стандарта *JMS* (от англ. *Java Messaging System*) и т.п. В частности, библиотека акторов *Akka* в последнее время стала очень популярной, так как предлагает технологию, позволяющую прозрачно разрабатывать распределенные системы. В настоящее время активно разрабатывается модуль этой библиотеки *Akka Cluster*, предоставляющий механизмы для открытых сетей. Имеются также случаи успешного применения *JMS* в мобильных *ad-hoc* сетях [14]. В качестве сервиса распределенных желтых страниц здесь может быть использована технология *Apache ZooKeeper*. Она централизованная, но центральный узел (лидер) выбирается из узлов, входящих в сеть. Если лидер *ZooKeeper* выйдет из строя, то выбирается новый лидер. Этот проект развивается уже давно и используется, например, в решении *Storm* (кластерная технология для обработки потоков данных в реальном времени), созданном компанией *Twitter*.

В итоге анализа достоинств и недостатков описанных вариантов обеспечения открытости сети, а также с учетом имеющегося собственного опыта в области разработки распределенной *p2p*-агентской платформы в данной работе выбор остановлен на использовании библиотеки акторов *Akka* для реализации *p2p*-агентской платформы, близкой к рабочему стандарту *FIPA* [12].

Заметим, что в последнее время появились и другие возможности по реализации *p2p*-концепции программно-коммуникационной инфраструктуры для реализации открытых *ad-hoc* сетей. Но они появились недавно, поэтому их достоинства и недостатки еще предстоит оценить.

2.3. Обеспечение информационной совместимости предприятий

Эта задача, решаемая в интересах интеграции предприятий в *B2B*-сеть, является одной из наиболее важных для поддержки возможности участия нескольких предприятий сети в распределенном выполнении общих бизнес-процессов и предусматривает реализацию:

- стандартных интерфейсов и сетевых протоколов, поддерживающих обмен сообщениями. В этом контексте нужно выбрать технологии обеспечения связи, допускающие интеграцию с существующими корпоративными информационными системами (КИС);
- стандартного языка обмена сообщениями. Сообщения, помимо контента, содержат также определенные "перформативы", т.е. коды (слова), управляющие протоколами распределенного взаимодействия. Необходимо описать множество управляющих перформативов для разработанных протоколов, а также разработать гибкую систему управления протоколами (в узлах), позволяющую расширять множество протоколов, доступных в сети. За основу можно взять язык *ACL*, предложенный в качестве стандарта в многоагентных системах;

⁵ В настоящее время эти задачи решаются в научном направлении, которое прямо называть *Software-Defined Networking* (сети, существующие на уровне программного обеспечения, виртуальные сети, *SDN*-сети). Частным случаем *SDN*-сетей являются так называемые оверлейные сети.

- стандартной формы представления информации. Необходимо выбрать единый язык описания содержимого сообщений (например, можно взять *BPEL* [15]), разработать онтологию (ее метауровень) для описания требований со стороны заказов к ресурсам, а также свойств заказов.

2.4. Поддержка стандартных протоколов взаимодействия узлов сети

Задача построения стандартных протоколов взаимодействия узлов сети в различных случаях использования (англ. *use cases*) и в конкретных сценариях их реализации имеет целью обеспечение единообразия протоколов взаимодействия узлов сети при решении содержательных задач. Примером этих задач является задача распределенного планирования заказа, поступившего в сеть через некоторый узел. Для решения задач планирования в данной работе предполагается использовать протокол контрактных сетей [16] или другой протокол аукциона. Еще одним примером протокола взаимодействия узлов В2В-сети может быть протокол распределенной координации локальных расписаний работы множества узлов сети при совместном выполнении ими множества бизнес-процессов.

Заметим, что все перечисленные здесь протоколы, как будет показано далее, реализуют *механизмы самоорганизации*.

3. Архитектура и варианты программной реализации В2В-сети

3.1. Многоагентные системы, самоорганизация и В2В-сети

Технология самоорганизующихся систем рассматривается в настоящее время как единственная информационная технология, которая в состоянии предложить адекватные методы, архитектуры и инструментальные средства поддержки для разработки и программной реализации наиболее сложных современных приложений, для которых характерны открытость, большая размерность, автономность составляющих ее подсистем, их сетевая организация, а также мобильность. Именно такие свойства характерны для В2В-сетей. Эффективная реализация В2В-сетей в иной архитектурной парадигме в настоящее время не представляется возможной.

В соответствии с общепринятым определением *самоорганизация* есть динамический адаптивный процесс, в котором структура и поведение системы возникают и поддерживаются только на основе локальных взаимодействий ее компонентов (обмена информацией, сообщениями) без какого-либо явного внешнего управления. Более детально самоорганизующиеся системы характеризуются следующим набором свойств [17]:

- автономность, т.е. отсутствие какого-либо управления извне;

- глобальный порядок (организация, структура), который возникает в системе только за счет локальных взаимодействий ее компонентов;
- эмерджентные свойства, которые не выводятся из наблюдения индивидуального поведения компонент, а наблюдаются только на метауровне;
- избыточность компонентов и их взаимодействий, а потому нечувствительность системы к локальным сбоям, что обеспечивает ее отказоустойчивость;
- адаптивность, т.е. способность системы изменять свое поведение и устойчивое состояние при изменении ее структуры и внешней среды;
- сложность, обусловленная тем, что самоорганизующиеся системы обычно состоят из большого числа автономных компонентов;
- простота правил взаимодействия компонентов системы, реализующих сложное эмерджентное поведение системы в целом.

Описанные свойства самоорганизующихся систем являются во многом аналогичными базовым свойствам В2В-сети как объекта управления, а вместе с тем, они отвечают требованиям к желаемому поведению этого объекта.

Большинство программных прототипов самоорганизующихся систем, разработанных к настоящему времени, используют архитектуру многоагентных систем (МАС), и это не случайно: в настоящее время парадигма МАС является единственной парадигмой концептуализации систем, которая имеет все необходимые средства для описания моделей автономных открытых систем сетевой структуры и большой размерности. Более того, основное развитие моделей самоорганизации и методов их программной реализации сейчас происходит именно на основе технологии МАС. Поэтому в данной работе теоретический и технологический базисы построения В2В-сети основываются на модели многоагентной самоорганизации. Покажем, что алгоритмы решения основных прикладных задач, представленных в разделах 1 и 2, используют механизмы самоорганизации.

Действительно, для решения задачи *планирования выполнения заказов*, динамически поступающих в сеть, в работе предлагается использовать *рыночный механизм* самоорганизации [18, 19]. В его основе лежит модель аукциона, частным случаем которого является протокол контрактных сетей. Он и алгоритм распределенной координации используют только локальную информацию и локальные взаимодействия. Напомним, что в этой модели отсутствует вмешательство извне, и все узлы В2В-сети самостоятельно решают, участвовать ли им в торгах в роли покупателя или продавца в транзакциях покупки/продажи некоторого количества того или иного ресурса. При этом в модели аукциона узлы сети устанавливают свои цены, базируясь целиком на *локальной информации*, хотя *косвенно* они получают также информацию об общем количестве ресурса и о потребности в нем *через предложение* конкретной цены.

Таким образом, общая идея самоорганизации процессов распределенного планирования совместного выполнения множества заказов в В2В-сети сводится к проведению множества *локальных аукционов* по множеству подзаказов на динамически формируемом *локальном множестве узлов* сети, которые рассматриваются как потенциальные исполнители соответствующих подзаказов.

Вторая прикладная задача, рассмотренная в разделе 1, а именно задача *составления распределенного расписания* выполнения множества бизнес-процессов, является одной из самых трудных и вычислительно сложных задач управления в В2В-сетях, она также решается на основе самоорганизации. В настоящее время в литературе имеется только одна постановка такой задачи [2], в которой используется механизм самоорганизации на основе волнового механизма взаимных уступок. В данной работе его идеи использованы как базис для построения механизмов распределенной координации расписаний.

Инфраструктурная компонента В2В-сети, как и всякая р2р-сеть, по сути, тоже функционирует на принципах самоорганизации. Описанные в разделе 2 принципы построения желтых и белых страниц и механизмы поиска сервисов и узлов, владеющих искомым сервисом, в разрабатываемой системе предполагается решать на основе локальных взаимодействий узлов сети и р2р-протоколов обмена сообщениями. Заметим, что хорошо известные аналоги р2р-систем, такие как *T-map протокол* [20], *Freenet* [21] и др., классифицируются именно как алгоритмы самоорганизации [18].

3.2. Архитектура В2В-сети и многоагентные системы

Требования, сформулированные к В2В-сетям, а именно открытость, присутствие динамики структуры и отсутствие централизованных регулирующих механизмов, налагают ограничения на возможную архитектуру В2В-сети. Децентрализация управления обычно рассматривается двояко, а именно с точки зрения управления данными (состояниями) и с точки зрения координации процессов. Для организации децентрализованной работы с данными существуют, по крайней мере, два варианта. Первый из них основан на механизме выбора лидера (англ. *leader election*), когда система с помощью специального алгоритма выбирает точку координации. Примером здесь может быть система *Apache ZooKeeper*, реализующая координацию состояний, представленных парами *ключ-значение* (англ. *key-value*) в распределенной среде. Здесь лидер управляет операциями изменения состояний. Этот подход имеет заметный недостаток, а именно отсутствие постоянной доступности системы. В нем, если вдруг узел-лидер выпадает из системы, запускается протокол выбора нового лидера, а это приводит к задержкам в работе системы. Второй вариант не предполагает выбора центра координации, и в нем

эти операции либо используют распределенные хэш-таблицы (так, например, реализована распределенная база данных *Cassandra*), либо реализуются с помощью протоколов координации состояний.

Другая проблема, которая возникает при создании распределенных/децентрализованных систем, обусловлена выбором способа взаимодействия узлов системы. К настоящему времени предложены два способа взаимодействия узлов: обмен сообщениями (англ. *messaging*) и использование досок объявлений (англ. *blackboard*). К последнему способу относятся также все способы организации взаимодействия через базы данных. Недостатком подхода с использованием досок объявлений является то, что она оказывается узким местом в том смысле, что отказы в ее работе приводят к отказу работы всей системы. Вместе с тем, оповещение разных узлов системы об изменении данных приходится организовывать либо на основе регулярных запросов в целях проверки изменения состояния (поллинга), либо с помощью триггеров, срабатывающих при изменении состояний узлов, что снова нагружает доску объявлений.

Взаимодействие на основе сообщений в последние годы становится основным трендом при разработке распределенных систем, поскольку позволяет добиться следующих свойств:

- прозрачность размещения (англ. *location transparency*). Это значит, что подобная система может работать на 10 узлах (или процессорах) так же, как и на одном узле, без дополнительных доработок;
- реактивность, т.е. компоненты системы реагируют сразу при поступлении сообщения, что позволяет добиться более низкого времени отклика системы;
- удобство балансировки (системы, построенные на основе сообщений, всегда проще балансируются).

Подход, использующий абстракцию сообщения на уровне парадигмы, в информационных технологиях представлен многоагентными системами и моделью акторов.

Моделью акторов называют средство организации вычислений, в котором логической единицей является сущность, именуемая актором, способная:

- а) отправить сообщение другому актору;
- б) создать другого актора;
- в) выбрать поведение для обработки очередного сообщения (поведение подразумевает исполнение некоторого кода в качестве реакции на сообщение).

При этом акторы исполняются параллельно, и каждый актор может одновременно обрабатывать только *одно сообщение*. Модель акторов со столь простыми правилами поведения оказалась, тем не менее, очень мощным средством для разработки *параллельных и распределенных* программ. В случае многоагентных систем такой единой модели представления технологии нет. Заметим, что некоторые авторы в понятие МАС включают и те системы, которые построены только на модели акторов.

Самой известной попыткой стандартизовать МАС являются спецификации FIPA. Они добавляются к коммуникационному уровню (*сущность — общение*):

- язык взаимодействия агентов *ACL* (англ. *Agent Communication Language*);
- средства описания содержания сообщений (англ. *Content Language*), в основном базирующиеся на логических языках, в частности на языках модальных и темпоральных логик;
- формальное понятие протокола взаимодействия;
- стандартные базовые протоколы (например, *CNP-protocol* и др.).

FIPA формализует также ряд важных сетевых сервисов, а именно сервисы *желтых страниц* (англ. *directory facilitator*), сервисы *белых страниц* (англ. *naming service*) и сервисы *онтологий* (англ. *ontology services*). Важно отметить, что модель FIPA использует также распределенную структуру *peer-to-peer* платформы [11, 12], в которой посредством распределенных алгоритмов (например, *Gossip*) удается установить так называемое *оверлейное* пространство взаимодействия агентов, в котором агенты могут прозрачно взаимодействовать друг с другом, "не замечая" того, что они физически распределены. Таким образом, платформа, удовлетворяющая базовым требованиям спецификации FIPA (англ. *FIPA-compliant*), позволяет организовать распределенную *peer-to-peer* среду работы агентов, обеспечивая распределенные службы каталогов (желтые страницы), сервис имен, и другие сервисы. Пример ее программной реализации дан в работе [13].

Таким образом, модель МАС как концепция построения B2B-сети позволяет удовлетворить всем требованиям к свойствам и возможностям B2B-сетей, которые ранее обсуждались в разделе 1 части 1 данной работы. Действительно, в основу МАС-парадигмы положены такие принципы функционирования, как (а) взаимодействие и коммуникации компонент, (б) открытость агентской платформы, поддерживающей взаимодействие компонент, и (в) стандартизация базовых протоколов взаимодействия. Эти принципы напрямую соответствуют требованиям со стороны B2B-сетей.

Многоагентный подход в этой части предоставляет достаточно хорошие возможности, которые обусловлены тем фактом, что в МАС основная ставка делается на использование *онтологий*, которые являются одним из уже классических средств для представления знаний (в том числе, метainформации о структуре данных). По сути, схемы баз данных и модели классов *UML* можно считать частными, упрощенными способами описания онтологий. Для работы с моделями онтологий разработано множество инструментов, позволяющих оперировать знаниями, в частности, извлекать знания из окружающего мира, создавать базы знаний, проводить рассуждения в терминах онтологий и др.

Более того, в теории онтологий развиваются такие направления, как выравнивание онтологий

(установление соответствия между несколькими различными онтологиями (англ. *ontology alignment* или *ontology matching* [22])) и онтологические трансформации [23]. Они особенно важны в рамках задачи обеспечения информационной совместимости узлов B2B-сети. Заметим, что метаданные сообщения, представленного на языке *ACL*, содержат в себе имя онтологии, в терминах которой представлено содержимое сообщения. В среде агентов при этом может существовать сервис онтологий. Это обычно специальный агент, предоставляющий информацию об элементах онтологии, а также позволяющий трансформировать сообщения из одной онтологии в другую. Таким образом, многоагентный подход удовлетворяет также и этому требованию к возможностям архитектуры B2B-сети, сформулированному в разделе 1.

Проведенный анализ показывает, что в настоящее время парадигма МАС как концепция построения модели B2B-сети является предпочтительной парадигмой, которая имеет все необходимые средства для выполнения требований к самоорганизующимся системам.

Заключение

В работе рассмотрена сетевая концепция ведения распределенного бизнеса, которую принято называть B2B-сетью, применительно к производственным сетям предприятий. Эта концепция развития промышленного производства рассматривается экономически развитыми странами как уже ближайшая перспектива интеграции предприятий в единое производственное пространство, например, в масштабе Европейского союза.

Производственная B2B-сеть обычно понимается как территориально распределенная сеть предприятий, каждое из которых обладает определенными компетенциями, технологиями и ресурсами. В этой сети полагается, что технологические возможности узлов сети взаимно дополняют друг друга, так что предприятия сети заинтересованы в кооперации, в особенности при производстве сложной продукции. Важно отметить, что концепция производственной B2B-сети может масштабироваться как на уровень множества производственных предприятий, так и на уровень множества подразделений отдельного предприятия. Следует также заметить, что сетевая организация производства является одной из моделей, на которые ориентируется современная цифровая экономика.

Естественно, что новые концепции и модели всегда ставят и новые проблемы. В данной работе проанализированы задачи, которые необходимо решать для того, чтобы концепция сетевой организации производства могла быть реализована на практике.

Первый результат данной работы состоит в том, что в ней сформулирован и проанализирован базовый комплекс задач, которые должна решать система управления производством, организованным в B2B-сеть. С алгоритмической точки зрения

наиболее сложными задачами управления функционирования В2В-сети являются задачи планирования выполнения распределенных бизнес-процессов и составления скоординированных расписаний исполнения планов при условии, что в выполнении одного бизнес-процесса может быть задействовано несколько узлов сети в последовательно-параллельном варианте. Работу этих узлов необходимо координировать как при планировании, так и при составлении расписаний. При этом обычно требуется обеспечить сохранение конфиденциальной информации узлов об их технологических возможностях, наличных ресурсах и их текущей и планируемой загрузке. Опыт участия авторов данной работы в практической реализации отдельных базовых компонентов системы управления сетевым производством отражен в ряде практических разработок по методам распределенного планирования и составления расписаний, описанным в работах [1, 2, 9].

Другой результат работы состоит в том, что в ней проведен анализ архитектуры и базовых задач программно-коммуникационной среды (инфраструктуры), которая преобразует множество отдельных предприятий в единый объект сетевой структуры. Опыт авторов в части практической разработки прототипов подобной инфраструктуры представлен, например, в работе [13].

Еще один результат данной работы — это конкретные варианты решений перечисленных выше задач, которые показывают практическую реализуемость концепции открытой самоорганизующейся В2В-сети производственных предприятий уже в настоящее время.

Разработка программного прототипа В2В-сети с совместным решением всех описанных задач планируется в качестве дальнейших исследований и разработок по теме В2В-сетей.

Список литературы

1. Бухвалов О. Л., Городецкий В. И., Карсаев О. В., Кудрявцев Г. И., Самойлов В. В. Производственная логистика: Стратегическое планирование, прогнозирование и управление конфликтами // Известия Южного федерального университета, 2012. № 3. С. 209—218.
2. Bukhvalov O., Gorodetsky V., Karsaev O., Koudryavtsev G., Samoylov V. Privacy-Preserved Distributed Coordination of Production Scheduling in B2B Networks: A Multi-agent Approach // Proc. 7th IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management, and Control. 2013. Материалы конференции. Vol. 7. Part 1. P. 2122—2127.
3. Chavez A., Maes P. Kasbah: An Agent Marketplace for Buying and Selling Goods // Proc. First Intern. Conf. "The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology", London, UK. 1996. P. 75—90.
4. Fisher K., Mueller J. P., Heimig I., Scheer A.-W. Intelligent Agents in Virtual Enterprises // Proc. First International. Conf. "The

Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology". London, UK. 1996. P. 205—224.

5. Jennings N., Paratin P., Jonson M. Using Intelligent Agents to Manage Business Processes // Proc. of the First International. Conf. "The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology", London, UK. 1996. P. 345—376.
6. Sandholm T. Negotiation among self-interested computationally limited agents. Ph. D. Thesis // University of Massachusetts Amherst, 1996. URL: <http://www.cs.cmu.edu/~sandholm/dissertation.ps>. (дата обращения: 30.01.2017).
7. Smith R., and Davis R. Framework for Cooperation in Distributed Problem Solving // International Journal IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1981. Vol. 11. P. 61—70.
8. Contract Net Protocol. URL: <http://www.fipa.org/specs/fipa00030/SC00030H.html>. (дата обращения: 30.01.2017).
9. Бухвалов О. Л., Карсаев О. В., Самойлов В. В. Использование многоагентного подхода в MES-системах // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2001. № 1 (39). С. 133—136.
10. JXTA. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/JXTA> (дата обращения: 16.11.2016).
11. UPnP Forum. URL: <http://upnp.org/specs/> (дата обращения: 30.01.2017).
12. Nomadic Agent Working Group. URL: <http://www.fipa.org/subgroups/P2PNA-WG-docs/P2PNA-Spec-Draft0.12.doc>. (дата обращения: 30.01.2017).
13. Городецкий В. И., Карсаев О. В., Самойлов В. В., Серебряков С. В. Инструментальные средства для открытых сетей агентов // Известия РАН. "Теория и Системы Управления" 2008. № 3. С. 106—124.
14. Vollset E., Ingham D., Ezhilchelvan P. JMS on Mobile Ad-hoc Networks. URL: http://pdf.aminer.org/000/382/876/jms_on_mobile_ad_hoc_networks.pdf. (дата обращения: 30.01.2017).
15. OASIS standard. Web Services Business Process Execution Language Version 2.0, 11 April 2007. URL: <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/OS/wsbpel-v2.0-OS.pdf>. (дата обращения: 30.01.2017).
16. Smith G. Contract Net Protocol: High-level Communication and Control in a Distributed Problem Solver // International Journal IEEE Transactions on Computers. 1980. V. 29. N 12. P. 1104—1113.
17. Serugendo D.-M., Gleizes G., and Karageorgos M.-P. Self-organization in multi-agent systems // Rapport de recherche IRIT/2005-18-R, IRIT, Universite Paul Sabatier, Toulouse. URL: http://www.irit.fr/TFGSO/DOCS/TFG2/TFGIISO_Long-Report.pdf. (дата обращения: 30.01.2017).
18. Городецкий В. И. Самоорганизация и многоагентные системы. Модели многоагентной самоорганизации // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 2. С. 92—120.
19. Городецкий В. И. Самоорганизация и многоагентные системы. II. Приложения и технология разработки // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 3. С. 55—75.
20. Jelasity M. and Babaoglu O. T-Man: Gossip-Based Overlay Topology Management // Series Lecture Notes in Artificial Intelligence. v. 3910 / Eds. Brueckner S. A. et al. Springer. 2006. P. 1—15.
21. Clarke I., Sandberg O., Wiley B., Andhong T. W. Freenet: A distributed anonymous information storage and retrieval system // Proc. International Workshop on Designing Privacy Enhancing Technologies. Springer, 2000. P. 46—66.
22. Noy N. F. Semantic Integration: A Survey Of Ontology-Based Approaches // Sigmod Record, Special Issue on Semantic Integration. 2004. URL: <http://www.ontologymatching.org>. (дата обращения: 30.01.2017).
23. Roser S. Ontology-based Model Transformation // ACM/IEEE 8th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems, 2005.

Self-Organized B2B Production Networks.

Part 2. Architecture and Algorithmic Support

V. I. Gorodetsky, gor@iias.spb.su, **O. L. Bukhvalov**, psychoveter@gmail.com,
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: **Gorodetsky Vladimir I.**, D. Sc.,
Chief Scientists of Intelligent Systems Laboratory, St. Petersburg Institute for Informatics
and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russian Federation
e-mail: gor@iias.spb.su

Accepted on August 14, 2017

Network-centric business model implemented as open self-organizing B2B production network is a relatively novel paradigm of modern digital economy. It has become the subject of the active research and developments during the last times. In particular, this fact is proved by several dozen of the projects on this topic funded by the European Commission Programs during last 15 years. The developed countries consider this novel paradigm of production business organization as a solid trend and a new very promising future model for distributed business, virtual organizations and digital economy as a whole. The paper outlines and analyzes various aspects of this problem and their algorithmic support. In its Part II, the paper formulates the basic production management tasks to be solved in B2B production networks, those include distributed planning and distributed coordinated scheduling of resources of B2B production network nodes (particular companies, production plants), which resources are involved concurrently in multiple common production processes. The paper also analyses the basic (core and reusable) set of tasks and services of the infrastructure aimed to realize the self-organizing style of the B2B production network performance, to support of node interactions and communications, and to provide for the network with the openness. It outlines the basic algorithms solving the aforementioned tasks and refers to the previously developed software prototypes implementing the particular most complicated algorithms supporting B2B performance in stand-alone mode that justify the feasibility of the B2B paradigm of production network at current time.

Keywords: B2B networks, multi-agent architecture, self-organization, distributed coordination, software and communication infrastructure, planning, scheduling

Acknowledgments: The research is being performed according to the SPIIRAS Governmental Project № 0073-2015-0003 and the Project # 214 of the Program #1.5P of the Russian Academy of Sciences.

For citation:

Gorodetsky V. I., Bukhvalov O. L. Self-Organized B2B Production Networks. Part 2. Architecture and Algorithmic Support, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 829—839.

DOI: 10.17587/mau.18.829-839

References

1. **Bukhvalov O., Gorodetsky V., Karsaev O., Koudriyatshev G., Samoylov V.** *Proizvodstvennaya logistika: Strategicheskoe planirovanie, prognozirovaniye i upravleniye konfliktami* (Production Logistics: Strategic Planning and Conflict Management), *Transactions of South Federal University*, 2012, no. 3, pp. 209—218 (in Russian).
2. **Bukhvalov O., Gorodetsky V., Karsaev O., Koudriyatshev G., Samoylov V.** Privacy-Preserved Distributed Coordination of Production Scheduling in B2B Networks: A Multi-agent Approach, *Proc. 7th IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management, and Control*, 2013, vol. 7, part 1, pp. 2122—2127.
3. **Chavez A., Maes P.** Kasbah: An Agent Marketplace for Buying and Selling Goods, *Proc. First Intern. Conf. "The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology"*, London, UK, 1996, pp. 75—90.
4. **Fisher K., Mueller J. P., Heimig I., Scheer A.-W.** Intelligent Agents in Virtual Enterprises, *Proc. First International. Conf. "The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology"*, London, UK, 1996, pp. 205—224.
5. **Jennings N., Paratin P., Jonson M.** Using Intelligent Agents to Manage Business Processes, *Proc. of the First International. Conf. "The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology"*, London, UK, 1996, pp. 345—376.
6. **Sandholm T.** Negotiation among self-interested computationally limited agents. Ph. D. Thesis, University of Massachusetts Amherst, 1996, available at: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=924453>, <http://www.cs.cmu.edu/~sandholm/dissertation.ps> (date of access 30.01.2017).
7. **Smith R., and Davis R.** Framework for Cooperation in Distributed Problem Solving, *International Journal IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1981, vol. 11, pp. 61—70.
8. **Contract Net Protocol**, available at: <http://www.fipa.org/specs/fipa00030/SC00030H.html> (date of access 30.01.2017).
9. **Bukhvalov O., Karsaev O., Samoylov V.** *Ispol'zovaniye mno-goagentnogo podkhoda v MES-systemakh* (Multi-agent Approach to MES-Systems), *Transactions of Kabardino-Balkarsky Scientific Cen-*

ter of the Russian Academy of Sciences, 2011, no. 1 (39), pp. 133—136 (in Russian).

10. **JXTA**, available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/JXTA> (date of access 30.01.2017).

11. **UPnP Forum**, available at: <http://upnp.org/specs/> (date of access 30.01.2017).

12. **Nomadic Agent Working Group**, available at: <http://www.fipa.org/subgroups/P2PNA-WG-docs/P2PNA-Spec-Draft0.12.doc> (date of access 30.01.2017).

13. **Gorodetsky V., Karsaev O., Samoylov V., Serebrykov S.** Development tools for open agent networks, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2008, no. 3, vol. 47, pp. 429—446 (in Russian).

14. **Vollset E., Ingham D., Ezhilchelvan P.** JMS on Mobile Ad-hoc Networks, available at: http://pdf.aminer.org/000/382/876/jms_on_mobile_ad_hoc_networks.pdf. (date of access: 30.01.2017).

15. **OASIS standard.** Web Services Business Process Execution Language Version 2.0, 11 April 2007, available at: <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/OS/wsbpel-v2.0-OS.pdf> (date of access: 30.01.2017).

16. **Smith G.** Contract Net Protocol: High-level Communication and Control in a Distributed Problem Solver, *International Journal IEEE Transactions on Computers*, 1980, vol. 29, no. 12, pp. 1104—1113.

17. **Serugendo D.-M., Gleizes G., and Karageorgos M.-P.** Self-organization in multi-agent systems, *Rapport de recherche IRIT/2005-18-R, IRIT*, Université Paul Sabatier, Toulouse, available at: http://www.irit.fr/TFGSO/DOCS/TFG2/TFGIISO_LongReport.pdf. (date of access: 30.01.2017).

18. **Gorodetskii V. I.** Self-Organization and Multi-agent Systems: I. Models of Multi-agent Self-Organization, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2012, vol. 51, no. 2, pp. 256—281 (in Russian).

19. **Gorodetskii V. I.** Self-Organization and Multi-agent Systems: II. Applications and the Development Technology, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2012, vol. 51, no. 3, pp. 391—409 (in Russian).

20. **Jelasity M., Babaoglu O.** T-Man: Gossip-Based Overlay Topology Management, *Series Lecture Notes in Artificial Intelligence*. v. 3910 / Eds. Brueckner S. A. et al., Springer, 2006, pp. 1—15.

21. **Clarke I., Sandberg O., Wiley B., Andhong T. W.** Freenet: A distributed anonymous information storage and retrieval system, *Proc. International Workshop on Designing Privacy Enhancing Technologies*, Springer, 2000, pp. 46—66.

22. **Noy N. F.** Semantic Integration: A Survey Of Ontology-Based Approaches, *Sigmod Record, Special Issue on Semantic Integration*, 2004, available at: <http://www.ontologymatching.org>. (date of access: 30.01.2017).

23. **Roser S.** Ontology-based Model Transformation, *ACM/IEEE 8th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems*, 2005.

С. П. Саханский, д-р техн. наук, проф.,

Сибирский государственный аэрокосмический университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева

Управление выращиванием кристаллов лейкосапфира

Разработана модель управления нагревом и скоростью вытягивания кристаллов лейкосапфира при выращивании из жидкого расплава. Модель работает в реальном масштабе времени, на современных контроллерах, обеспечивая плоский фронт кристаллизации кристалла во время всего процесса. Приведена структурная схема весовой системы управления для вытягивания кристаллов лейкосапфира на основе взвешивания убывающего расплава в тигле и получения сигнала управления в функции отклонения текущей площади кристалла от заданной.

Ключевые слова: выращивание кристаллов лейкосапфира, управление нагревом и скоростью вытягивания, весовая система управления

Введение

Лейкосапфир представляет собой монокристаллы оксида алюминия (Al_2O_3). Сапфир — один из самых твердых минералов, оптически прозрачен, обладает высокой температурой плавления, исключительно стоек к разрушениям, в том числе в агрессивных средах. Обладает высокой теплопроводностью при низких температурах и высоким удельным сопротивлением. Лейкосапфир синтезируется в промышленных масштабах по всему миру. Для выращивания особо чистых монокристаллов сапфира большого размера, пригодных для получения пластин и изготовления подложек с различной ориентацией, а также других изделий с высокими оптическими свойствами, обычно используют метод Киропулоса (Мусатова, ГОИ) или метод Чохральского, при котором выращивание кристалла осуществляется из неподвижного молибденового или вольфрамового тигля, с расплавом из жидкого материала. Мощность нагрева изменяется в пределах заданного диапазона мощности (например, при подводимой мощности 50 кВт и постоянном напряжении на нагревателе 24 В управление происходит за счет изменения тока нагревателя в диапазоне 0...2 кА). Резистивный нагреватель изготавливается, как правило, из набора тугоплавких вольфрамовых стержней.

По мере роста кристалл постепенно вытягивают из расплава, вращая его вокруг собственной оси. При выращивании диаметр выращиваемого кристалла ограничивается лишь размерами тигля и может достигать 500 мм и более.

Для снижения остаточных напряжений, приводящих к растрескиванию, выращенные кристаллы подвергаются отжигу в специальных высоковакуумных отжиговых установках. Сложности технологического процесса получения качественных кристаллов лейкосапфира посвящены работы [1, 2].

Экспериментальный завод научного приборостроения РАН ФГУП ЭЗАН наладил выпуск ряда промышленных установок вытягивания кристаллов лейкосапфира, в частности установки НИК-3, которая имеет следующие характеристики:

- диаметр выращиваемых кристаллов 0...150 мм;
- система взвешивания имеет линейный диапазон 0...10 кг и чувствительность 0,04 г;
- скорость вытягивания кристалла регулируется в диапазоне 0,02...2 мм/мин;
- скорость вращения кристалла изменяется в пределах 1...100 мин⁻¹;
- мощность источника нагрева установлена равной 100 кВт и регулируется в диапазоне 1...100 %.

В разработанных в данное время у нас и за рубежом установках вытягивания кристаллов лейкосапфира из неподвижного тигля с жидким расплавом имеются следующие особенности:

- управление температурой расплава проводится косвенно, за счет регулирования подводимой к нагревателю мощности, так как применение при температурах более 2200 °С датчиков температуры на основе термопар для ее регулирования или использования показаний радиационного пирометра оказалось сложной задачей;
- контроль и управление текущей площадью выращиваемого кристалла происходит визуально, через верхнее смотровое окно установки (при наблюдении и коррекции оператором текущего диаметра кристалла) или на основе сигнала управления с датчика веса (весов, взвешивающих неподвижный тигель с расплавом или сам выращиваемый кристалл);
- для диаметров кристалла более 500 мм часто управление вращением затравки кристалла отсутствует (в связи с большой массой кристалла и опасностью его обрыва от затравки в процессе роста);

- диапазон рабочих скоростей вытягивания лейкосапфира очень низок, поэтому длительность процесса выращивания кристалла может достигать нескольких недель, что требует высоконадежной работы оборудования и полной автоматизации процесса выращивания.

Весовой метод выращивания кристаллов

В последнее время большое развитие получил предложенный фирмой Royal Radar Establishment метод непосредственного контроля изменения диаметра растущего кристалла путем непосредственного взвешивания самого кристалла или тигля с расплавом [3]. В работах [4, 5] для взвешивания тигля применены стандартные электронные весы, здесь же указывается на необходимость учета в формировании сигнала управления сил поверхностного натяжения и на достигнутую точность поддержания диаметра кристалла весовым методом в пределах 1 %.

При весовом методе выращивание кристаллов лейкосапфира происходит в тигле с внутренним диаметром D , в котором находится жидкий расплавленный металл (рис. 1). Кристалл диаметром d вытягивается из расплава со скоростью вытягивания V_3 и скоростью вращения W_3 кристалла. Выращиваемый кристалл помещен в закрытую тепловую оснастку для обеспечения необходимых температурных условий роста. Процесс проводится в камере с инертным газом или в вакууме. Ток расплава поддерживается за счет управления мощностью нагревателя с использованием показаний датчика тока нагревателя, это управление осуществляет стандартный управляемый регулятор тока.

Вес убывающего расплава в тигле измеряется системой взвешивания тигля. Система управления на базе ЭВМ вычисляет разностный сигнал управления как функцию отклонения текущей площади

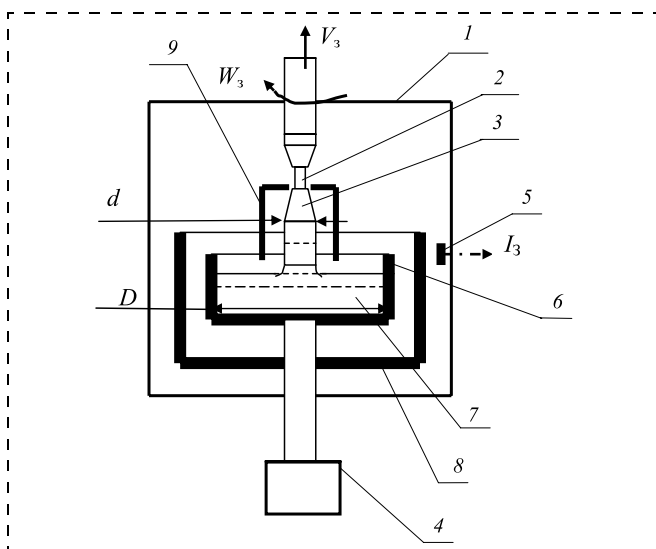


Рис. 1. Схема весового метода измерения при выращивании кристаллов лейкосапфира:

1 — камера; 2 — заправка; 3 — кристалл; 4 — весы; 5 — датчик тока; 6 — тигель; 7 — расплав металла; 8 — нагреватель; 9 — тепловая оснастка

кристалла от заданной на основе вычисленных перемещений кристалла и изменения веса убывающего расплава в неподвижном тигле, вводя корректирующий сигнал управления по температуре в мощность нагрева и скорость вытягивания кристалла.

Контур изменения мощности (тока), подаваемый на нагреватель, является одним из основных контуров программного регулирования температуры, обеспечивающего заданную форму слитка. При этом в качестве датчика обратной связи по температуре для лейкосапфира удобно взять датчик силы тока нагревателя при заданном постоянном напряжении нагревателя.

Исходя из вышеизложенного принципы автоматического управления современной системой автоматического выращивания кристаллов лейкосапфира можно свести к следующим основным циклам.

1. Автоматическое вакуумирование установки, расплавление, выдержка в расплавленном состоянии и снижение температуры до температуры затравления при расплавлении материала лейкосапфира в неподвижном тигле.

2. Автоматизированное или с участием оператора затравление и вытягивание шейки кристалла определенной длины.

3. Автоматизированное вытягивание прямого конуса кристалла.

4. Автоматизированное вытягивание цилиндрической части кристалла.

5. Автоматический отжиг кристалла в камере по программе с завершением процесса вытягивания.

Ниже приводится математический аппарат формирования управляющих воздействий.

Системы управления реализуются, как правило, на базе современных контроллеров и ЭВМ, при этом программно задаются изменения всех параметров вытягивания:

T_3 — температуры расплава (или тока нагревателя I_3);

V_3 — скорости вытягивания кристалла;

W_3 — скорости вращения кристалла.

Сигнал от весовой системы регулирования диаметра воздействует пропорционально на скорость вытягивания и интегрально на температуру (ток) на цилиндрической части выращивания кристалла. Управление скоростью вытягивания кристалла $V_3(x)$, током нагревателя $I_3(x)$, скоростью вращения кристалла $W_3(x)$ выполняется на основе следующих выражений:

$$V_3(x) = V_{3п}(x) + ZK_V \Delta y;$$

$$I_3(x) = I_{3п}(x) + ZA_T [\Delta y dx];$$

$$W_3(x) = W_{3п}(x),$$

где K_V — пропорциональный коэффициент регулирования по скорости; A_T — интегральный коэффициент регулирования по температуре; $V_{3п}(x)$, $W_{3п}(x)$, $I_{3п}(x)$ — программное задание закона изменения технологических параметров; $V_3(x)$, $W_3(x)$, $I_3(x)$ — общие управления технологическими параметрами; Z — признак захвата управления по диаметру на цилиндрической части кристалла; x — пе-

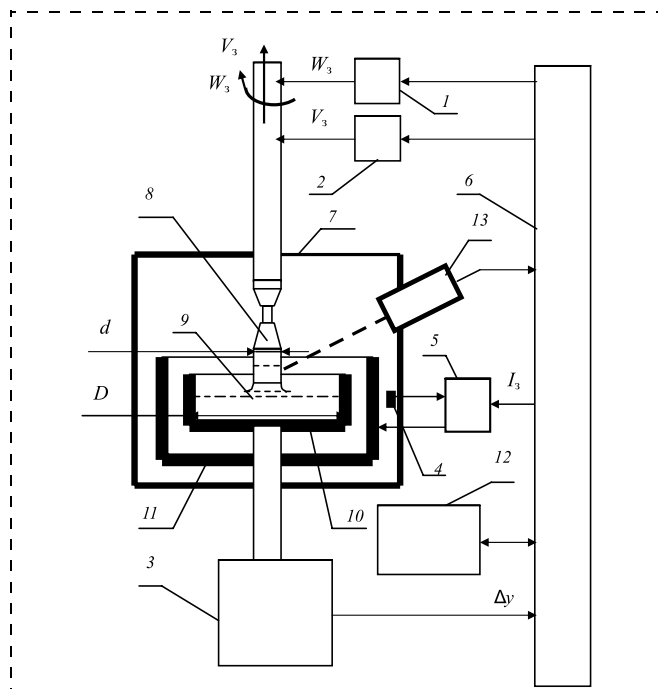


Рис. 2. Структурная схема системы управления выращиванием лейкосапфира на основе весового метода измерения:
 1 — привод вращения затравки; 2 — привод перемещения затравки; 3 — весы; 4 — датчик тока; 5 — преобразователь тока; 6 — контроллер; 7 — камера; 8 — слиток; 9 — расплав металла; 10 — тигель; 11 — нагреватель; 12 — ЭВМ; 13 — оптический пирометр



Рис. 3. Кристаллы лейкосапфира

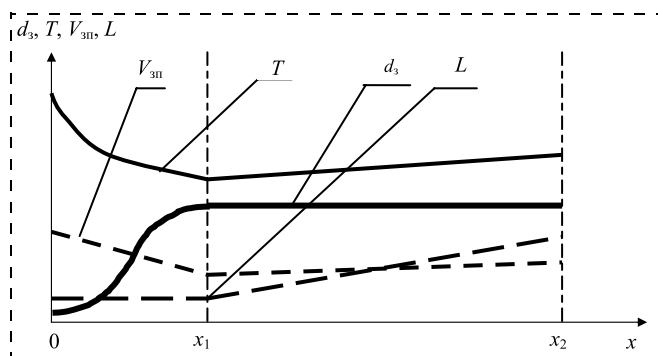


Рис. 4. Управление параметрами процесса выращивания кристаллов лейкосапфира:
 d_3 — задание диаметра выращиваемого монокристалла; T — программное задание закона изменения температуры; L — задание осевого градиента; x — перемещение кристалла; x_1 — координата завершения формирования прямого конуса кристалла; x_2 — координата завершения формирования цилиндрической части кристалла; $V_{3п}$ — программное изменение скорости вытягивания

ремещение вдоль оси кристалла; Δy — сигнал отклонения заданной площади кристалла от текущей на основе изменения веса тигля.

Процесс стабилизации диаметра кристалла происходит в системе управления по приведенным выше выражениям при включении признака захвата управления по диаметру ($Z = 1$) на цилиндрической части выращиваемого кристалла. Подробная структурная схема весовой системы управления при выращивании лейкосапфира представлена на рис. 2.

При весовом методе выращивания кристаллов лейкосапфира в тигле с внутренним диаметром D находится жидкий расплавленный металл, кристалл диаметром d вытягивается из расплава со скоростью вытягивания V_3 и скоростью вращения W_3 кристалла. Выращиваемый монокристалл помещен в закрытую тепловую оснастку для обеспечения необходимых температурных условий роста. Процесс проводится в камере с инертным газом или в вакууме.

Ток расплава поддерживается постоянным за счет управления мощностью нагревателя с использованием показаний датчика тока (шунта постоянного тока), которое осуществляет стандартный управляемый регулятор.

Вес убывающего расплава в тигле измеряется системой взвешивания тигля. Система управления на базе ЭВМ вычисляет разностный сигнал управления как функцию отклонения текущей площади кристалла от заданной на основе вычисленных перемещений кристалла и изменения веса убывающего расплава в неподвижном тигле. Оптический пирометр через смотровое окно установки направлен на твердую часть выращиваемого кристалла для измерения и ввода в систему осевого градиента в твердой части выращиваемого кристалла. На рис. 3 приведен вид полученных на основе весового метода измерения готовых кристаллов лейкосапфира.

Если в системе управления выращиванием кристаллов из расплава в соответствии с заданной формой (геометрией) выращивания кристалла сформировать управление скоростью вытягивания и температурой кристалла при обеспечении фронта кристаллизации кристалла, близкого к плоскому в течение всего процесса, то это дает возможность обеспечить высокое качество получаемых монокристаллов. Для сохранения стабильного роста кристалла дополнительно необходима плавность перехода из начальной стадии вытягивания от кристаллической затравки кристалла к выращиванию прямого конуса, а также завершение перехода с выращивания прямого конуса на цилиндрическую часть кристалла. В общем виде процесс управления основными параметрами выращивания кристалла при выращивании из жидкого расплава кристаллов лейкосапфира изображен на рис. 4.

Форма прямого и обратного конуса выращиваемого кристалла (рис. 4) имеет вид косиноусоидальных непрерывных линий на участке прямого конуса, с нулевым начальным и конечным углом сопряжения с поверхностью выращиваемого кристалла. Это обеспечивает плавный переход и устойчивость роста кристалла на переходных участках.

Математическая модель выращивания кристаллов

Ниже приводятся математические выражения для формирования программного управления температурой $T(x)$ и скоростью вытягивания $V_{зп}(x)$, полученные на основе работ [6–16], которые позволяют автоматизировать процесс ввода данных параметров в систему управления.

Модель управления температурой и скоростью при выращивании кристаллов можно представить в виде выражения

$$T(x) = F(Z, Y, V_{зп}(x), L(x), x), \quad (1)$$

где $T(x)$ — средняя температура расплава в зоне фронта кристаллизации; $V_{зп}(x)$ — скорость вытягивания кристалла; x — координата перемещения вдоль оси кристалла; $L(x)$ — линейный осевой градиент в твердом кристалле; Z — геометрические параметры выращиваемого кристалла; Y — теплофизические параметры материала.

При выращивании материалов из жидкого расплава их фронт кристаллизации, отделяющий жидкую часть расплава от твердой, поднимается над поверхностью расплава на 1...5 см.

Если приравнять вес поднятой массы жидкого столбика расплава (до фронта кристаллизации) силам поверхностного натяжения, действующим по окружности, и учесть выражение высоты столбика расплава через уравнение теплового баланса на фронте кристаллизации, то можно получить зависимость [16] диаметра кристалла d от скорости вытягивания V_3 и температуры расплава T в виде выражения

$$d = C_t \frac{[L - C_V V_3]}{[T - T_k]}, \quad (2)$$

где $C_V = \rho_{ж} \frac{E}{\lambda_{ТВ}}$; $C_t = 4 \frac{\sigma \lambda_{ТВ}}{\rho_{ж} \lambda_{ж} g}$; V_3 — скорость вытягивания кристалла; T_k — температура кристаллизации материала; T — средняя температура расплава в зоне фронта кристаллизации; L — линейный осевой градиент в твердом кристалле; E — удельная теплота плавления материала; $\lambda_{ж}$ — коэффициент теплопроводности расплава; $\lambda_{ТВ}$ — коэффициент теплопроводности кристалла; g — ускорение свободного падения; σ — поверхностное натяжение расплава; $\rho_{ж}$ — удельная плотность жидкого материала; d — диаметр выращиваемого кристалла.

Для задания средней температуры расплава выражение (2) можно представить в виде

$$T(x) = T_k + C_t \frac{[L - C_V V_{зп}(x)]}{d_3(x)}, \quad (3)$$

где $d_3(x)$ — программное задание выращиваемого диаметра кристалла; $V_{зп}(x)$ — программное задание скорости вытягивания кристалла; x — координата перемещения кристалла.

Управление скоростью вытягивания кристаллов лейкосапфира в закрытой тепловой оснастке позволяет сформировать плоский фронт кристалли-

зации при выращивании прямого конуса кристалла и его цилиндрической части, что необходимо для многих марок кристалла.

Выражение (2) можно рассматривать в следующем виде для определения необходимой скорости вытягивания кристалла:

$$\lambda = C_t \frac{[L - C_V V_3]}{d}, \quad (4)$$

где $\lambda = [T - T_k]$ — величина среднего перегрева расплава относительно температуры кристаллизации материала.

В общем случае перегрев λ согласно уравнениям есть функция осевого градиента в кристалле L и задаваемой скорости вытягивания V_3 кристалла. Перегрев λ и осевой градиент выращиваемого кристалла могут быть определены путем замера оптическим пирометром (через смотровое окно установки вытягивания) области, прилежащей к фронту кристаллизации материала при отработке конкретной технологии выращивания кристаллов.

Используя линейную аппроксимацию скорости вытягивания на узловых участках выращивания кристалла (прямой конус, цилиндрическая часть), можно получить выражения для определения задания скорости вытягивания на конусной и цилиндрической частях кристалла соответственно:

$$V_{зп}(x) = V_0 - \frac{x[V_0 - V_1]}{x_1};$$

$$V_{зп}(x) = V_1 - \frac{(x - x_1)[V_1 - V_2]}{(x_2 - x_1)},$$

где $V_3(x) = V_{зп}(x)$ — программное задание скорости вытягивания; V_0 — начальная скорость вытягивания кристалла при включении режима "автомат"; V_1 — скорость вытягивания кристалла при завершении формирования обратного конуса; V_2 — скорость вытягивания кристалла при завершении формирования цилиндра; x_1 — координата завершения формирования прямого конуса кристалла; x_2 — координата завершения формирования цилиндрической части кристалла; x — координата перемещения по оси кристалла.

Для определения значений координат скорости вытягивания в узловых точках (V_0 , V_1 , V_2 , V_3) преобразуем выражение (4) к виду

$$V_3(d) = \left[L - \frac{\lambda d}{C_t} \right] \frac{\beta_i}{C_V}, \quad (5)$$

где $V_3(d)$ — скорость вытягивания кристалла; d — диаметр кристалла; β_i — технологический коэффициент снижения скорости (0,95...0,25).

Из выражения (5) для узловых точек скорости вытягивания получим следующие выражения:

$$V_0 = \left[L_0 - \frac{\lambda d_0}{C_t} \right] \frac{\beta_0}{C_V};$$

$$V_1 = \left[L_0 - \frac{\lambda d_1}{C_t} \right] \frac{\beta_1}{C_V};$$

$$V_2 = \left[L_1 - \frac{\lambda d_1}{C_t} \right] \frac{\beta_2}{C_V},$$

где L_0 — осевой градиент в начале цилиндрической части кристалла; L_1 — осевой градиент в конце цилиндрической части кристалла; V_0, V_1, V_2 — узловые точки скорости вытягивания; d_0 — диаметр вытягиваемой шейки кристалла при включении режима "автомат"; d_1 — диаметр цилиндрической части кристалла.

Технологические поправочные коэффициенты β_i вводятся для возможности корректировки скорости вытягивания на основе технологических требований (например, равномерности легирования кристалла по его длине при допущении некоторого прогиба фронта кристаллизации в сторону расплава на цилиндрической части выращиваемого кристалла).

Косинусоидальный закон для непрерывного вычисления управляющим контроллером в системе управления установкой выращивания задается на прямом конусе в виде цепной дроби Якоби [17] обычной точности по выражению

$$\cos(x) =$$

$$= (\pi/2 - x) \left[K_1 + \frac{K_2}{(\pi/2 - x)^2 + K_3 + \frac{K_4}{(\pi/2 - x)^2 + K_5}} \right],$$

где $K_1 = 6,63550098$; $K_2 = -729,384055$; $K_3 = 52,9056381$; $K_4 = 1212,885446$; $K_5 = 15,8503569$.

Используя линейную аппроксимацию параметров на остальных участках выращивания кристалла, можно получить выражения для вычисления программы управления скоростью и температурой на всех участках при косинусоидальном задании формы выращивания прямого конуса кристалла.

Выражения по заданию диаметра $d_3(x)$ и температуры $T(x)$ на прямом конусе кристалла примут вид

$$d_3(x) = d_0 + \frac{(d_1 - d_0)}{2} - \left(\frac{d_1 - d_0}{2} \right) \cos\left(\frac{\pi}{x_1} x\right);$$

$$T_{\text{зп}}(x) = T_K + C_t \frac{[L_0 - C_V V_{\text{зп}}(x)]}{\left[d_0 + \frac{(d_1 - d_0)}{2} - \left(\frac{d_1 - d_0}{2} \right) \cos\left(\frac{\pi}{x_1} x\right) \right]},$$

где x_1 — координата завершения формирования прямого конуса кристалла; L_0 — осевой градиент в кристалле на конусной части; d_0 — диаметр вытягиваемой шейки кристалла; d_1 — диаметр цилиндрической части кристалла.

Выражения, задающие диаметр $d_3(x)$ кристалла и температуру $T(x)$ на цилиндрической части кристалла, имеют вид

$$d_3(x) = d_1;$$

$$T(x) = T_K + C_t \frac{\left[L_0 + [x - x_1] \frac{(L_1 - L_0)}{(x_2 - x_1)} - C_V V_{\text{зп}}(x) \right]}{d_1},$$

где x_2 — координата завершения формирования цилиндрической части кристалла; L_1 — осевой градиент в кристалле в конце цилиндрической части.

В свою очередь, выражения для линейного задания диаметра $d_3(x)$ кристалла и температуры $T(x)$ на участке выращивания прямого конуса кристалла будут иметь вид

$$d_3(x) = d_0 + \frac{x[d_1 - d_0]}{x_1};$$

$$T_{\text{зп}}(x) = T_K + C_t \frac{[L_0 - C_V V_{\text{зп}}(x)]}{\left[d_0 + \frac{x[d_1 - d_0]}{x_1} \right]}.$$

Моделирование скорости и температуры выращивания кристалла лейкосапфира на основе приведенной модели и теплофизических постоянных материала [18] проиллюстрировано на рис. 5—7

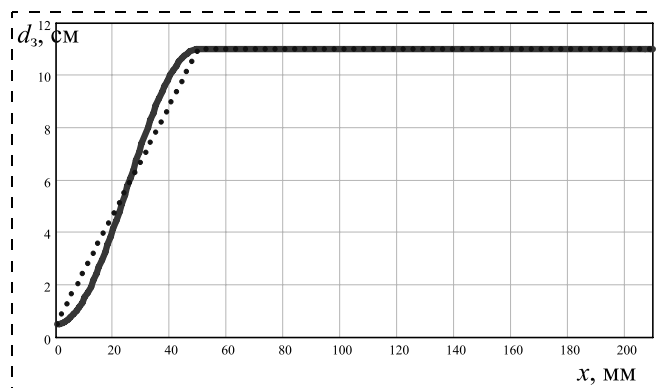


Рис. 5. Задание диаметра кристалла лейкосапфира при: $x_1 = 50$ мм; $x_2 = 210$ мм; $x_3 = 260$ мм; $d_0 = 0,5$ см; $d_1 = 11$ см

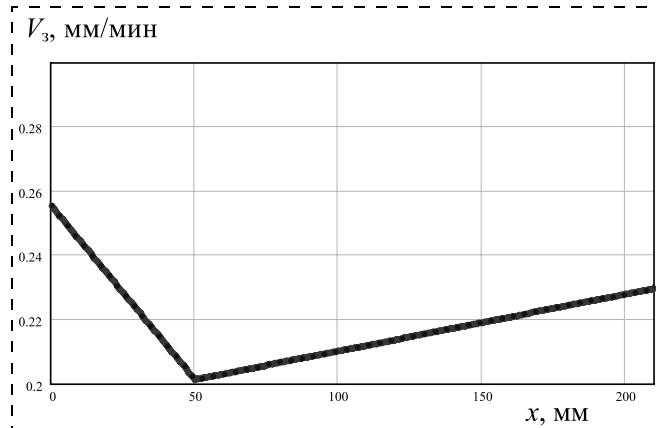


Рис. 6. Задание скорости вытягивания лейкосапфира при: $d_0 = 0,5$ см; $x_1 = 50$ мм; $x_2 = 210$ мм; $x_3 = 260$ мм; $d_1 = 11$ см; $\lambda = 0,4$ °C; $\beta_1 = 0,8$; $\beta_2 = 0,8$; $\beta_3 = 0,4$; $\beta_4 = 0,6$; $L_0 = 20$ °C/см; $L_1 = 40$ °C/см

как для линейного, так и для косинусоидального видов задания прямого конуса кристалла (косинусоидальный закон выделен сплошной линией).

При переходе управления от температуры к управлению током нагревателя необходимо на установке вытягивания определить коэффициент KI связи силы тока управления резистивным нагревателем (при постоянном напряжении на нагревателе) с температурой расплава, при измерении темпера-

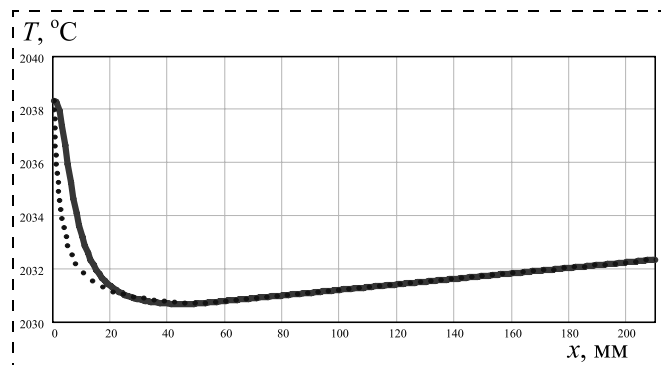


Рис. 7. Задание температуры вытягивания лейкосапфира при: $d_0 = 0,5$ см; $x_1 = 50$ мм; $x_2 = 210$ мм; $x_3 = 260$ мм; $d_1 = 11$ см; $\lambda = 0,4$ °C; $\beta_1 = 0,8$; $\beta_2 = 0,8$; $\beta_3 = 0,4$; $\beta_4 = 0,6$; $L_0 = 20$ °C/см; $L_1 = 40$ °C/см

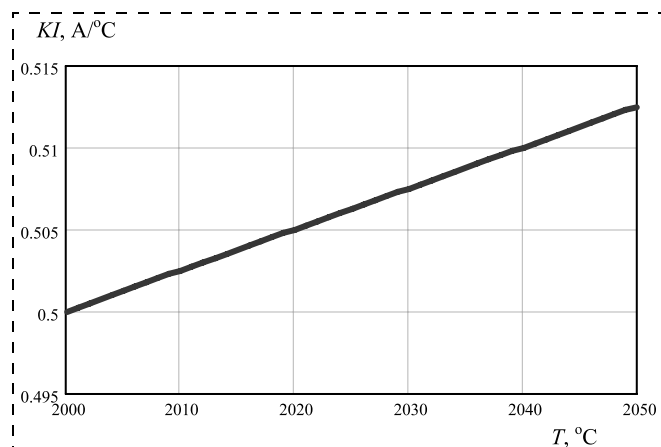


Рис. 8. График зависимости коэффициента KI от температуры расплава

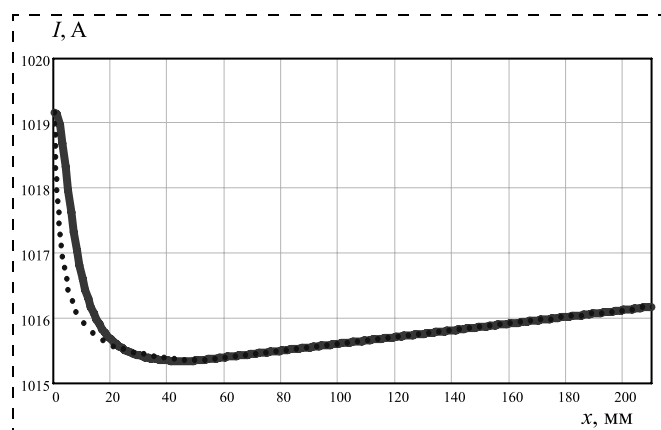


Рис. 9. Задание тока вытягивания лейкосапфира при: $d_0 = 0,5$ см; $x_1 = 50$ мм; $x_2 = 210$ мм; $x_3 = 260$ мм; $d_1 = 11$ см; $\lambda = 0,4$ °C; $\beta_1 = 0,8$; $\beta_2 = 0,8$; $\beta_3 = 0,4$; $\beta_4 = 0,6$; $L_0 = 20$ °C/см; $L_1 = 40$ °C/см; $KI = 0,5$ A/°C

туры расплава материала оптическим пирометром. График измерения приведен на рис. 8, в результате после преобразований на рис. 9 была получена программа задания силы тока нагревателя.

Переходными формулами для задания силы тока на прямом конусе (для косинусоидального закона) и на цилиндрической части кристалла служат следующие выражения:

$$I_{3п}(x) = \left(T_k + C_t \frac{[L_0 - C_V V_{3п}(x)]}{\left[d_0 + \frac{(d_1 - d_0)}{2} - \left(\frac{d_1 - d_0}{2} \right) \cos\left(\frac{\pi x}{x_1} \right) \right]} \right) KI;$$

$$I_{3п}(x) = \left(T_k + C_t \frac{\left[L_0 + [x - x_1] \frac{(L_1 - L_0)}{(x_2 - x_1)} - C_V V_{3п}(x) \right]}{d_1} \right) KI,$$

где KI — переходной коэффициент установки вытягивания лейкосапфира при резистивном нагревателе (с управлением по току).

Заключение

Получена модель управления мощностью нагрева и скоростью вытягивания кристаллов лейкосапфира при выращивании из жидкого расплава, которая позволяет вводить данное управление в систему управления установкой вытягивания, обеспечивая плоский фронт кристаллизации кристалла в процессе выращивания и получение необходимой формы готовой продукции.

Предложенная модель управления может быть применена на установках вытягивания кристаллов лейкосапфира, а алгоритм вычисления работает в реальном масштабе времени под управлением современных управляющих контроллеров, имеющих арифметику с плавающей запятой в системе команд контроллера.

Список литературы

1. Багдасаров Х. С. Высокотемпературная кристаллизация из расплава. М.: Физматлит, 2004. 160 с.
2. Клуникова Ю. В. Модель влияния параметров технологического процесса получения сапфира на качество кристаллов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 7 (108). С. 198—203.
3. Bardsley W., Green G. W., Holliday C. H., Hurle D. T. J. Crystal Growth. 1972. vol. 16, no. 3, pp. 277—279.
4. Blumberg H., Reiche P., Watringer W. A. Czochralski crystal puller automated by the weighing method // Crystal Research and Technology. 1981. vol. 10, no. 11, pp. 1323—1338.
5. Blumberg H., Reiche F. A. Czochralski crystal puller automated by the weighing technique // Eur. Meet. Cryst. Growth., 82: Mater. Electron. Prague, Aug, 23—28, 1982, Usti nad Labem, s. a., pp. 51—52.
6. Шендерович И. Л., Шубский Г. И. Принципы построения систем управления процессом выращивания монокристаллов методом Чохральского // Научные труды Гиредмета. 1976. Т. 78. С. 111—115.
7. Саханский С. П. Управление температурой нагревателя на установке выращивания монокристаллов германия // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2008. № 1. С. 42—46.

8. Саханский С. П., Баркин С. М. Модель управления температурой при выращивании кремния // Вестник СибГАУ. 2010. Т. 3, Вып. 29. С. 149—153.
9. Саханский С. П., Якобсон М. Е. Модель управления скоростью вытягивания монокристаллов кремния // Вестник СибГАУ. 2010. Т. 5, Вып. 31. С. 254—258.
10. Саханский С. П. Управление скоростью вытягивания на установке выращивания монокристаллов германия // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008. № 4. С. 7—11.
11. Саханский С. П. Управление температурой при выращивании монокристаллов германия // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 3. С. 8—10.
12. Саханский С. П. Управление скоростью вытягивания при выращивании монокристаллов кремния // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2010. № 8. С. 37—39.

13. Саханский С. П. Модель управления формой при выращивании монокристаллов германия // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 6. С. 2—5.
14. Саханский С. П. Задание температуры при выращивании монокристаллов кремния // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 2. С. 44—48.
15. Саханский С. П. Управление формой полупроводниковых кристаллов при выращивании по способу Чохральского // Журнал СВУ. Техника и технологии. 2014. Т. 7, Вып. 1. С. 20—31.
16. Саханский С. П. Управление процессом выращивания монокристаллов германия. Красноярск: Изд. СибГАУ, 2008. 104 с.
17. Благовещенский Ю. В. Вычисление элементарных функций на ЭВМ. Киев: Техника, 1977. 207 с.
18. Физические величины: Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

Control of Cultivation of Leicosapphir Crystals

S. P. Sakhansky, Sahanskiy@yandex.ru,

Reshetnev Siberian University of Science and Technology, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

Corresponding author: Sakhanskiy Sergei P., D. Sc., Professor at the department of management information systems, Reshetnev Siberian University of Science and Technology, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, E-mail: Sahanskiy@yandex.ru

Accepted on August 14, 2017

A model is developed for controlling the heating and the rate of drawing of leucosapphir crystals, when grown from a liquid melt. The model operates in real-time, on modern controllers, providing a flat front of crystal crystallization throughout the process. A block diagram of the weight control system for growing leucosapphir crystals is presented based on weighing the descending melt in a crucible and obtaining a control signal in function of deviating the current crystal area from a given one. The above model control heating and crystal pulling rate of sapphire crucible stationary liquid melt operates based on reference shape of the growing crystal and the axial gradient throughout the process and allows to set the drawing speed and the power for the heating installation, before starting the growth process. On the basis of the liquid melt, which changes during the growth of the weight, a correction signal is introduced in the control system as a deviation of the varying weight of the crucible with the melt from the programmed one on the cylindrical part of the grown crystal. The control signal, as an integral component, is introduced into the heating power circuit, and as proportional to the pulling speed loop, periodically each cycle of the crystal moving by 1 mm, provides the given shape of the grown cylindrical part of the crystal. The results of this work can be used in the design and modernization of existing growth plants for the growth of leucosapphir crystals from a fixed crucible with a melt.

Keywords: cultivation of leucosapphir crystals, control of heating and drawing speed, weight control system

For citation:

Sakhansky S. P. Control of Cultivation of Leicosapphir Crystals, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 840—846.

DOI: 10.17587/mau.18.840-846

References

1. Bagdasarov Kh. S. *Vysokotemperaturnaya kristallizatsiya iz rasplava* (High-temperature crystallization from a melt), Moscow, Fizmatlit, 2004, 160 p. (in Russian).
2. Klunnikova Yu. V. Model' vliyaniya parametrov tekhnologicheskogo tekhnologicheskogo protsessa polucheniya sifira na kachestvo kristallov (Model of the influence of parameters of the technological process of obtaining sapphire on the quality of crystals), *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2010, no. 7 (108), pp. 198—203 (in Russian).
3. Bardsley W., Green G. W., Holliday C. H., Hurle D. T. J. *Growth*, 1972, vol. 16, no. 3, pp. 277—279.
4. Blumberg H., Reiche P., Watringer W. A. Czochralski crystal puller automated by the weighing method, *Crystal Research and Technology*, 1981, vol. 10, no. 11, pp. 1323—1338.
5. Blumberg H., Reiche F. A. Czochralski crystal puller automated by the weighing technique, *Eur. Meet. Cryst. Growth*, 82: Mater. Electron. Prague, Aug. 23—28, 1982, Usti nad Labem, s.a., pp. 51—52.
6. Shenderovich I. L., Shubskiy G. I., *Printsiy postroyeniya sistem upravleniya protsessom vyrashchivaniya monokristallov metodom Chokhralskogo* (Principles for constructing control systems for the growing of single crystals by the Czochralski method), *Nauchnye Trudy Giredmeta*, Moscow, 1976, vol. 78, pp. 111—115 (in Russian).
7. Sakhanskiy S. P. Upravlenie temperaturoy nagrevatelya na ustanovke vyrashchivaniya monokristallov germaniya (Controlling the temperature of the heater in a plant for growing germanium single crystals), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2008, no. 1, pp. 42—46 (in Russian).
8. Sakhanskiy S. P., Barkin C. M. Model' upravleniya temperaturoy pri vyrashchivaniya kremniya (Temperature control model for silicon growth), *Vestnik SibGAU*, 2010, vol. 3, no. 29, pp. 149—153 (in Russian).
9. Sakhanskiy S. P., Yakobson M. E. Model' upravleniya skorost'yu vytyagivaniya monokristallov kremniya (Model for controlling the drawing speed of silicon monocrystals), *Vestnik SibGAU*, 2010, vol. 5, no. 31, pp. 254—258 (in Russian).
10. Sakhanskiy S. P. Upravlenie skorost'yu vytyagivaniya na ustanovke vyrashchivaniya monokristallov germaniya (Controlling the drawing speed in a plant for growing germanium single crystals), *Pribory i sistemy. Upravlenie. Kontrol'. Diagnostika*, 2008, no. 4, pp. 7—11 (in Russian).
11. Sakhanskiy S. P. Upravlenie temperaturoy pri vyrashchivaniya monokristallov germaniya (Temperature control in growing single crystals of germanium), *Pribory i sistemy. Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii*, 2009, no. 3, pp. 8—10 (in Russian).
12. Sakhanskiy S. P. Upravlenie skorost'yu vytyagivaniya pri vyrashchivaniya monokristallov kremniya (Office pulling speed in growing single crystals of silicon), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 8, pp. 37—39 (in Russian).
13. Sakhanskiy S. P. Model' upravleniya formoy pri vyrashchivaniya monokristallov germaniya (Management model form in growing single crystals of germanium), *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2012, no. 6, pp. 2—5 (in Russian).
14. Sakhanskiy S. P. Zadanie temperatury pri vyrashchivaniya monokristallov kremniya (Setting the temperature for growing silicon single crystals), *Pribory i sistemy. Upravlenie. Kontrol'. Diagnostika*, 2011, no. 2, pp. 44—48 (in Russian).
15. Sakhanskiy S. P. Control of the shape of semiconductor crystals when grown using the Czochralski method, *J/Sib. Fed. Univ. Eng., Technol.*, 2014, vol. 7 no. 1, pp. 20—31 (in Russian).
16. Sakhanskiy S. P. Upravlenie protsessom vyrashchivaniya monokristallov germaniya: monografiya (Management process of growing single crystals of germanium: monograph), *SibGAU Publ.*, 2008, 104 p. (in Russian).
17. Blagoveshchenskiy Y. V. *Vychislenie elementarnykh funktsiy na EVM*. (Calculation of elementary functions on computers.), Kiev, Technique, 1977, 207 p. (in Russian).
18. Babichev A. P., Babushkina N. A., Bratkovskiy A. M. ed. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik* (Physical quantities: Directory), Moscow, Energoatomizdat, 1991, 1232 p. (in Russian).

Я. Г. Сапунков, канд. физ.-мат. наук, доц.,
А. В. Молоденков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., iptmuran@san.ru,
Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов

Квазиоптимальный алгоритм разворота осесимметричного космического аппарата при произвольных граничных условиях

В кватернионной постановке рассматривается задача оптимального в смысле минимума энергетических затрат разворота осесимметричного космического аппарата (КА) как твердого тела при произвольных граничных условиях без ограничения на функцию управления. С помощью замен переменных исходная задача оптимального разворота осесимметричного КА упрощается (в смысле динамических уравнений Эйлера) до задачи оптимального разворота твердого тела со сферическим распределением масс, содержащей одно дополнительное скалярное дифференциальное уравнение. Для этой задачи представлено аналитическое приближенное решение в классе обобщенных конических движений. Дается алгоритм квазиоптимального разворота КА. Приводятся численные примеры.

Ключевые слова: осесимметричное твердое тело, космический аппарат, оптимальный разворот, квазиоптимальное решение, обобщенное коническое движение, произвольные граничные условия

Введение

Построение управления пространственной переориентацией космического аппарата (КА) как твердого тела в традиционной постановке включает задачи программного углового движения (разворота), программного управления и поиска управления, стабилизирующего программу углового движения в малом. Задача расчета программного углового движения и реализующего его управления во многих случаях решается с помощью методов теории оптимального управления. Точное аналитическое решение этой задачи для наиболее часто используемых функционалов оптимизации при произвольных граничных условиях по угловому положению и угловой скорости КА не найдено даже в случае сферической симметрии КА, не говоря уже о его произвольной динамической конфигурации. Известны лишь некоторые частные случаи решения задачи (см., например, [1–8]); в общем случае приходится рассчитывать только на приближенные численные методы. Между тем, аналитическое решение задачи оптимального разворота КА в замкнутой форме имеет не только теоретический, но и большой практический интерес, так как позволяет использовать на борту космических аппаратов готовые законы программного управления и изменения оптимальной траектории.

В настоящей статье в традиционной постановке рассматривается задача оптимального в смысле минимума энергетических затрат разворота КА как твердого тела с одной осью симметрии при произвольных граничных условиях по угловому положению и угловой скорости КА без ограничения на уп-

равление. Время переориентации КА произвольно и зафиксировано. С помощью замен переменных исходная задача оптимального разворота осесимметричного КА упрощается (в смысле динамических уравнений Эйлера) до задачи оптимального разворота твердого тела со сферическим распределением масс, содержащей одно дополнительное скалярное дифференциальное уравнение. В классе обобщенных конических движений проведена модификация полученной задачи оптимального разворота, которая позволила получить аналитические решения для уравнений движения, содержащие произвольные постоянные и две произвольные скалярные функции (параметры обобщенного конического движения). Относительно этих функций и их производных формулируется и решается оптимизационная задача, в которой в качестве управлений выступают вторые производные от этих двух функций. Полученное аналитическое решение модифицированной задачи может рассматриваться как приближенное (квазиоптимальное) решение традиционной задачи оптимального разворота КА при произвольных граничных условиях. Следует отметить, что для случаев аналитической разрешимости традиционной задачи оптимального разворота при сферической симметрии твердого тела, когда наложены ограничения на краевые условия задачи — плоский эйлеров разворот [7], коническое движение [9], — решения традиционной и модифицированной задач полностью совпадают. На примере осесимметричного КА "Спейс Шаттл", рассматриваемого как твердое тело, приводятся результаты численных решений задачи оптимального разворота

в традиционной и модифицированной постановках для нескольких вариантов граничных условий по угловому положению и угловой скорости КА. Расхождение между значениями функционала качества в рассматриваемых решениях для традиционной и модифицированной задачи не превышает 0,3 %. Надо заметить, что значение функционала качества процесса управления является определяющей характеристикой задачи.

Статья продолжает исследования, начатые в работах [9, 10].

1. Постановка традиционной задачи оптимального разворота

Движение КА как твердого тела с одной осью симметрии вокруг центра масс описывается дифференциальными уравнениями [1]

$$2\dot{\mathbf{L}} = \mathbf{L} \circ \mathbf{w}; \quad (1.1)$$

$$\begin{aligned} I_1 \dot{w}_1 &= M_1; \\ I_2 \dot{w}_2 &= M_2 - (I_1 - I_2)w_1w_3; \\ I_2 \dot{w}_3 &= M_3 + (I_1 - I_2)w_1w_2, \end{aligned} \quad (1.2)$$

где $\mathbf{L}(t) = l_0(t) + l_1(t)i_1 + l_2(t)i_2 + l_3(t)i_3$ (кватернион поворота КА); $\mathbf{w}(t) = w_1(t)i_1 + w_2(t)i_2 + w_3(t)i_3$ (вектор угловой скорости КА) — фазовые координаты; $\mathbf{M}(t) = [M_1(t), M_2(t), M_3(t)]^T$ — (вектор внешнего момента, действующего на КА) — управление. Фазовые координаты и управление подчинены требованиям задачи понтрягинского типа ($\mathbf{L}(t)$, $\mathbf{w}(t)$ — функции непрерывные, $\mathbf{M}(t)$ — кусочно-непрерывная функция); кватернион $\mathbf{L}(t)$ нормирован, т.е. $\|\mathbf{L}\| = l_0^2 + l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 = 1$; i_1, i_2, i_3 — орты гиперкомплексного пространства (мнимые единицы Гамильтона), которые можно идентифицировать с ортами трехмерного векторного пространства $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \mathbf{i}_3$, символ "o" означает кватернионное умножение. В динамических уравнениях Эйлера (1.2) для твердого тела с одной осью симметрии (направленной в нашем случае вдоль орта $\mathbf{i}_1$ связанной с твердым телом системы координат) I_1, I_2 — главные центральные моменты инерции твердого тела, $I_1, I_2 = \text{const} > 0$.

Заданы произвольные граничные условия по угловому положению

$$\mathbf{L}(0) = \mathbf{L}_0, \mathbf{L}(T) = \mathbf{L}_T \quad (1.3)$$

и угловой скорости КА

$$\mathbf{w}(0) = \mathbf{w}_0, \mathbf{w}(T) = \mathbf{w}_T. \quad (1.4)$$

Требуется определить оптимальное управление $\mathbf{M}^{\text{опт}}(t)$ системой (1.1), (1.2) при граничных условиях (1.3), (1.4), доставляющее минимум функционалу

$$J = \int_0^T (M_1^2 + M_2^2 + M_3^2) dt, \quad (1.5)$$

где время T произвольно и зафиксировано.

Следуя работе [11], можно полагать, что функционал (1.5) пропорционален энергетическим затратам на создание управляющего момента твердого тела.

2. Замены переменных в уравнениях движения КА

Перейдем от размерных переменных задачи к безразмерным по формулам

$$\begin{aligned} t^{\text{безраз}} &= t/T, \mathbf{w}^{\text{безраз}} = \mathbf{w}T, \mathbf{M}^{\text{безраз}} = \mathbf{M}T^2/I^{\text{масш}}, \\ J^{\text{безраз}} &= JT^3/(I^{\text{масш}})^2, I_k^{\text{безраз}} = I_k/I^{\text{масш}}, k = 1, 2, \\ I^{\text{масш}} &= ((I_1^2 + 2I_2^2)/3)^{1/2}, \end{aligned}$$

при этом вид формул (1.1)—(1.4) не изменится, а функционал (1.5) запишется так:

$$J = \int_0^1 (M_1^2 + M_2^2 + M_3^2) dt.$$

Далее будем иметь в виду постановку задачи (1.1)—(1.5) (где $T = 1$) в безразмерных переменных, и верхние индексы у них будут опущены.

В целях упрощения (в смысле динамических уравнений Эйлера) задачи (1.1)—(1.5) осуществим замены переменных, аналогичные сделанным в работах [12, 13], сводящие исходную задачу оптимального разворота осесимметричного КА (твердого тела) к задаче оптимального разворота тела со сферическим распределением масс. Для этого перепишем уравнения (1.2) в виде

$$\dot{w}_1 = m_1;$$

$$\dot{w}_2 = b_1m_2 - bw_1w_3;$$

$$\dot{w}_3 = b_1m_3 - bw_1w_2,$$

где $m_1 = M_1/I_1, m_2 = M_2/I_1, m_3 = M_3/I_1, b = (I_1 - I_2)/I_2, b_1 = I_1/I_2$.

Замена переменных $w_k(t)$

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(bb_1^{-1}\int_0^t \omega_1(\tau)d\tau\right) & -\sin\left(bb_1^{-1}\int_0^t \omega_1(\tau)d\tau\right) \\ 0 & \sin\left(bb_1^{-1}\int_0^t \omega_1(\tau)d\tau\right) & \cos\left(bb_1^{-1}\int_0^t \omega_1(\tau)d\tau\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

где $\omega_k = \omega_k(t), k = \overline{1, 3}$, — новые переменные, преобразует уравнения (1.2) следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_1 \\ \dot{\omega}_2 \\ \dot{\omega}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 \cos\left(bb_1^{-1}\int_0^t \omega_1(\tau)d\tau\right) & b_1 \sin\left(bb_1^{-1}\int_0^t \omega_1(\tau)d\tau\right) \\ 0 & -b_1 \sin\left(bb_1^{-1}\int_0^t \omega_1(\tau)d\tau\right) & b_1 \cos\left(bb_1^{-1}\int_0^t \omega_1(\tau)d\tau\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

или в кватернионной записи

$$\dot{\omega} = \tilde{\mathbf{B}} \circ b_1 \mathbf{m} \circ \mathbf{B}; \quad (2.3)$$

$$\mathbf{B}(t) = \exp \left\{ \mathbf{i}_1 b_2 \int_0^t \omega_1(\tau) d\tau / 2 \right\}, \quad (2.4)$$

где "∼" — сопряжение кватерниона, а "exp{.}" — кватернионная экспонента, $b_2 = b b_1^{-1} = 1 - I_2/I_1 = 1 - b_1^{-1}$.

Отметим, что $|\mathbf{B}(t)| = 1, \forall t$.

Кватернионное уравнение углового движения КА (2.1) при этом запишется следующим образом:

$$2\dot{\mathbf{L}} = \mathbf{L} \circ \mathbf{B} \circ (b_1^{-1} \omega_1 \mathbf{i}_1 + \omega_2 \mathbf{i}_2 + \omega_3 \mathbf{i}_3) \circ \tilde{\mathbf{B}}, \quad (2.5)$$

где кватернион $\mathbf{B}$ определяется соотношением (2.4).

С учетом первого соотношения системы (1.2) и начального условия по угловой скорости КА (1.4) уравнение (2.3) можно переписать следующим образом:

$$\dot{\omega} = \tilde{\beta} \circ b_1 \mathbf{m} \circ \beta; \quad (2.6)$$

$$\beta(t) = \exp \left\{ \mathbf{i}_1 b_2 \int_0^t \left(\int_0^\tau m_1(\xi) d\xi + w_{0_1} \right) d\tau / 2 \right\}. \quad (2.7)$$

Нелинейное выражение, стоящее в правой части уравнения (2.6) и зависящее только от переменных $m_k(t), k = 1, 3$, примем за новое управление $\mathbf{u}(t)$:

$$\mathbf{u} = \tilde{\beta} \circ b_1 \mathbf{m} \circ \beta, \quad (2.8)$$

где β определяется выражением (2.7). Отметим, что $u_1(t) = b_1 m_1(t)$, и поэтому в замене переменных (2.8) всегда можно совершить обратный ход: по новой векторной переменной $\mathbf{u}(t)$ (когда она будет известна) восстановить управление $\mathbf{m}(t)$ задачи (1.1)–(1.5).

Модуль вектора нового управления связан с модулем вектора управляющего момента КА следующим образом:

$$|\mathbf{u}| = |\tilde{\beta} \circ b_1 \mathbf{m} \circ \beta| = b_1 |\tilde{\beta}| |\mathbf{m}| |\beta| = b_1 |\mathbf{m}| = b_1 |\mathbf{M}|/I_1 = |\mathbf{M}|/I_2.$$

Исходя из соотношения (2.5) осуществим еще одну замену переменных

$$\mathbf{L} = \mathbf{A} \circ \tilde{\mathbf{B}}, \quad (2.9)$$

где $\mathbf{A} = \mathbf{A}(t)$ — новая кватернионная переменная, описывающая угловое положение КА.

С учетом всех указанных выше замен переменных и вспомогательного обозначения

$$\theta(t) = b_2 \int_0^t \omega_1(\tau) d\tau \quad (2.10)$$

задача оптимального разворота твердого тела (1.1)–(1.5) примет вид

$$2\dot{\mathbf{A}} = \mathbf{A} \circ \omega; \quad (2.11)$$

$$\dot{\omega} = \mathbf{u}; \quad (2.12)$$

$$\theta^* = b_2 \omega_1; \quad (2.13)$$

$$\theta(0) = 0; \quad (2.14)$$

$$\omega(0) = \omega_0 = b_1 w_{0_1} \mathbf{i}_1 + w_{0_2} \mathbf{i}_2 + w_{0_3} \mathbf{i}_3;$$

$$\omega(T) = \omega_T = \tilde{\mathbf{B}}(\theta(T)) \circ$$

$$\circ (b_1 w_{T_1} \mathbf{i}_1 + w_{T_2} \mathbf{i}_2 + w_{T_3} \mathbf{i}_3) \circ \mathbf{B}(\theta(T)); \quad (2.15)$$

$$\mathbf{A}(0) = \mathbf{A}_0 = \mathbf{L}_0;$$

$$\mathbf{A}(T) = \mathbf{A}_T = \mathbf{L}_T \circ \mathbf{B}(\theta(T)), T = 1; \quad (2.16)$$

$$J = I_2^2 \int_0^1 \mathbf{u}^2 dt \rightarrow \min. \quad (2.17)$$

В этой задаче искомыми величинами являются $\mathbf{u}^{\text{опт}}, \mathbf{A}^{\text{опт}}, \omega^{\text{опт}}$, а $\mathbf{B}(\theta(T)) = \exp\{\mathbf{i}_1 \theta(T)/2\}$. Как видно, векторное дифференциальное уравнение (2.12) имеет структуру, соответствующую динамическим уравнениям Эйлера для сферически симметричного твердого тела. Это существенно облегчает исследование задачи.

3. Модифицированная задача оптимального разворота

Одной из основных проблем при построении аналитического решения в задаче оптимального разворота КА (твердого тела) является разрешимость классической задачи Дарбу — аналитического определения $\mathbf{A}(t)$ из уравнения (2.11) при известных $\mathbf{A}_0, \omega(t)$.

Для кватернионного дифференциального уравнения (2.11) при условии, что вектор угловой скорости $\omega(t)$ задается выражением

$$\omega(t) = \mathbf{i}_1 \frac{df}{dt} \sin g(t) + \mathbf{i}_2 \frac{df}{dt} \cos g(t) + \mathbf{i}_3 \frac{dg}{dt}, \quad (3.1)$$

в котором $f(t)$ и $g(t)$ — произвольные функции времени, известно решение [14], удовлетворяющее начальному условию (2.16):

$$\mathbf{A}(t) = \mathbf{A}_0 \circ \exp\{-\mathbf{i}_3 g(0)/2\} \circ \exp\{-\mathbf{i}_2 f(0)/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_2 f(t)/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_3 g(t)/2\}. \quad (3.2)$$

Формулы (3.1), (3.2) включают в себя все известные точные аналитические решения традиционной задачи оптимального разворота твердого тела при его сферической симметрии, когда вектор угловой скорости на всем интервале времени движения твердого тела постоянен по направлению или описывает в пространстве круговой конус [1–3, 5–9].

Заметим [14], что задачу Дарбу с произвольно заданным вектором угловой скорости $\omega(t)$ с помощью замен переменных можно свести к решению уравнения типа (2.11) с угловой скоростью

$$\omega^*(t) = -\left(\mathbf{i}_1 \frac{df}{dt} \sin g(t) + \mathbf{i}_2 \frac{df}{dt} \cos g(t) + \mathbf{i}_3 \frac{dg}{dt} \right),$$

отличающейся от выражения (3.1) только знаком. При этом явное аналитическое решение этой задачи, как и при произвольном векторе $\omega(t)$, неизвестно.

Выражение (3.1) и решение (3.2) можно обобщить, добавив поворот на постоянный угол вокруг некоторой оси. Такой поворот задается с помощью кватерниона $\mathbf{K}$, $\|\mathbf{K}\| = 1$. Тогда вектор ω и кватернион Λ будут определяться соотношениями

$$\omega = \tilde{\mathbf{K}} \circ \left(\mathbf{i}_1 \frac{df}{dt} \sin g(t) + \mathbf{i}_2 \frac{df}{dt} \cos g(t) + \mathbf{i}_3 \frac{dg}{dt} \right) \circ \mathbf{K}; \quad (3.3)$$

$$\Lambda = \Lambda_0 \circ \tilde{\mathbf{K}} \circ \exp\{-\mathbf{i}_3 g(0)/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_2(f(t) - f(0))/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_3 g(t)/2\} \circ \mathbf{K}. \quad (3.4)$$

Будем рассматривать вторые производные от функций f и g в качестве управляющих параметров. Тогда, если ввести обозначения

$$\frac{df}{dt} = f_1, \quad \frac{dg}{dt} = g_1, \quad (3.5)$$

то можно составить систему дифференциальных уравнений, описывающих управляемую систему:

$$\frac{df}{dt} = f_1, \quad \frac{dg}{dt} = g_1, \quad \frac{df_1}{dt} = v_1, \quad \frac{dg_1}{dt} = v_2, \quad (3.6)$$

где f, f_1, g, g_1 — фазовые координаты; v_1, v_2 — управляющие параметры.

Ограничимся случаем, когда кватернион $\mathbf{K}$ представляется в виде произведения

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_2 \circ \mathbf{K}_1, \quad \mathbf{K}_1 = \exp\{\mathbf{i}_1 \alpha_1/2\}, \quad \mathbf{K}_2 = \exp\{\mathbf{i}_2 \alpha_2/2\}, \quad (3.7)$$

где α_1, α_2 — некоторые постоянные. Отметим, что кватернионы $\mathbf{K}_1$ и $\mathbf{K}_2$ определяют поворот вектора ω (3.1) вокруг осей $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2$. Поворот вокруг оси $\mathbf{i}_3$ уже включен в формулу (3.3), если учесть, что в функцию $g(t)$ входит аддитивная постоянная. Сопряженный кватернион $\tilde{\mathbf{K}}$ будет представляться в виде

$$\tilde{\mathbf{K}} = \tilde{\mathbf{K}}_1 \circ \tilde{\mathbf{K}}_2, \quad \tilde{\mathbf{K}}_1 = \exp\{-\mathbf{i}_1 \alpha_1/2\}, \quad \tilde{\mathbf{K}}_2 = \exp\{-\mathbf{i}_2 \alpha_2/2\}. \quad (3.8)$$

Условия того, что выражения для ω, Λ (3.3), (3.4) удовлетворяют граничным условиям (2.15), (2.16) с учетом (3.7), (3.8), запишутся в виде

$$\tilde{\mathbf{K}}_1 \circ \tilde{\mathbf{K}}_2 \circ (\mathbf{i}_1 f_1(0) \sin g(0) + \mathbf{i}_2 f_1(0) \cos g(0) + \mathbf{i}_3 g_1(0)) \circ \mathbf{K}_2 \circ \mathbf{K}_1 = b_1 w_{01} \mathbf{i}_1 + w_{02} \mathbf{i}_2 + w_{03} \mathbf{i}_3; \quad (3.9)$$

$$\tilde{\mathbf{K}}_1 \circ \tilde{\mathbf{K}}_2 \circ (\mathbf{i}_1 f_1(1) \sin g(1) + \mathbf{i}_2 f_1(1) \cos g(1) + \mathbf{i}_3 g_1(1)) \circ \mathbf{K}_2 \circ \mathbf{K}_1 = \tilde{\mathbf{B}}(\theta(1)) \circ (b_1 w_{T1} \mathbf{i}_1 + w_{T2} \mathbf{i}_2 + w_{T3} \mathbf{i}_3) \circ \mathbf{B}(\theta(1)); \quad (3.10)$$

$$\text{vect}(\mathbf{L}_0 \circ \tilde{\mathbf{K}}_1 \circ \tilde{\mathbf{K}}_2 \circ \exp\{-\mathbf{i}_3 g(0)/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_2(f(1) - f(0))/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_3 g(1)/2\} \circ \mathbf{K}_2 \circ \mathbf{K}_1 \circ \tilde{\mathbf{B}}(\theta(1)) \circ \mathbf{L}_T) = 0. \quad (3.11)$$

Тогда для управляемой системы (3.6) можно сформулировать следующую задачу оптимального управления. Требуется найти оптимальные управления $v_1(t), v_2(t)$, которые переводят управляемую систему (3.6) из начального состояния

$$f = f(0), f_1 = f_1(0), g = g(0), g_1 = g_1(0) \quad (3.12)$$

в конечное состояние

$$f = f(T), f_1 = f_1(T), g = g(T), g_1 = g_1(T), \quad (3.13)$$

удовлетворяющие соотношениям (3.9)—(3.11), в которых α_1, α_2 выступают как параметры, подлежащие определению, и доставляют минимум функционалу

$$J = \int_0^1 (v_1^2 + v_2^2) dt. \quad (3.14)$$

Такую задачу оптимального управления (с учетом замен переменных (2.1), (2.4), (2.7)—(2.9)) будем называть модифицированной задачей оптимального разворота осесимметричного КА (твёрдого тела).

Учитывая соотношение (3.7), можно записать компоненты вектора ω (3.3) в виде

$$\begin{aligned} \omega_1 &= f_1 \sin g \cos \alpha_2 - g_1 \sin \alpha_2; \\ \omega_2 &= f_1 (\sin g \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 + g_1 \cos g \cos \alpha_1) + g_1 \sin \alpha_1 \cos \alpha_2; \\ \omega_3 &= f_1 (\sin g \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 - g_1 \cos g \sin \alpha_1) + g_1 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Компоненты вектора управления $\mathbf{u}$, который согласно выражению (2.12) является производной по времени от вектора ω , определяются по формулам

$$\begin{aligned} u_1 &= \dot{\omega}_1 = (v_1 \sin g + f_1 g_1 \cos g) \cos \alpha_2 - v_2 \sin \alpha_2; \\ u_2 &= \dot{\omega}_2 = v_1 (\sin g \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 + \cos g \cos \alpha_1) + f_1 g_1 (\cos g \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 - \sin g \cos \alpha_1) + v_2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_2; \\ u_3 &= \dot{\omega}_3 = v_1 (\sin g \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 - \cos g \sin \alpha_1) + f_1 g_1 (\cos g \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 + \sin g \sin \alpha_1) + v_2 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Квадрат вектора $\mathbf{u}$, который является подынтегральной функцией в функционале (2.17), согласно выражениям (3.16) определяется по формуле

$$\mathbf{u}^2 = v_1^2 + v_2^2 + f_1^2 g_1^2. \quad (3.17)$$

4. Решение задачи с помощью принципа максимума

Функция Гамильтона—Понтрягина [15] для поставленной задачи оптимального управления имеет вид

$$H = -(v_1^2 + v_2^2) + \psi_1 f_1 + \psi_2 g_1 + \psi_3 v_1 + \psi_4 v_2, \quad (4.1)$$

где $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ — сопряженные переменные, удовлетворяющие системе уравнений

$$\frac{d\psi_1}{dt} = 0, \frac{d\psi_2}{dt} = 0, \frac{d\psi_3}{dt} = -\psi_1, \frac{d\psi_4}{dt} = -\psi_2. \quad (4.2)$$

Общее решение уравнений (4.2), содержащее произвольные постоянные $c_1, \dots, c_4$, имеет вид

$$\psi_1 = c_1, \psi_2 = c_2, \psi_3 = -c_1 t + c_3, \psi_4 = -c_2 t + c_4. \quad (4.3)$$

Из условия максимума для функции Гамильтона—Понтрягина (4.1) определяется оптимальное управление

$$\begin{aligned} v_1 &= \psi_3/2 = (-c_1 t + c_3)/2; \\ v_2 &= \psi_4/2 = (-c_2 t + c_4)/2. \end{aligned} \quad (4.4)$$

После подстановки (4.4) в систему уравнений (3.6) находится общее решение для фазовых координат, содержащее восемь произвольных постоянных $c_1, \dots, c_8$:

$$\begin{aligned} f &= -c_1 t^3/12 + c_3 t^2/4 + c_5 t + c_7; \\ g &= -c_2 t^3/12 + c_4 t^2/4 + c_6 t + c_8; \\ f_1 &= -c_1 t^2/4 + c_3 t/2 + c_5; \\ g_1 &= -c_2 t^2/4 + c_4 t/2 + c_6. \end{aligned} \quad (4.5)$$

В связи с тем, что постоянная c_7 входит в функцию f как аддитивная постоянная, то из формулы (3.4) для кватерниона Λ видно, что эта постоянная не оказывает влияние, поэтому c_7 можно положить равной нулю. Из формул (3.3), (3.4), (3.7), (4.5) видно, что в выражения для вектора ω и кватерниона Λ входят девять произвольных постоянных $c_1, \dots, c_6, c_8, \alpha_1, \alpha_2$, для определения которых имеется девять условий (3.9)—(3.11). Если формулы (4.5) подставить в соотношения (3.3), (3.4), то будут получены аналитические выражения для определения законов изменения оптимальной угловой скорости и оптимальной траектории КА. Эти выражения определяют оптимальный в смысле минимума комбинированного функционала (3.14) разворот КА в классе обобщенных конических движений. Далее по формулам (2.1), (2.4), (2.9) вычисляются вектор безразмерной угловой скорости $\mathbf{w}$ и кватернион ориентации КА $\mathbf{L}$. По формулам (3.16) определяются компоненты вектора $\mathbf{u}$. Из выражений (2.7), (2.8) следует, что безразмерный управляющий момент $\mathbf{M}$ выражается через вектор $\mathbf{u}$ следующим образом:

$$\mathbf{M} = I_2 \tilde{\mathbf{B}}(\theta) \circ \mathbf{u} \circ \mathbf{B}(\theta). \quad (4.6)$$

Формула (4.6) определяет аналитическое решение для управляющего момента, соответствующего решению модифицированной задачи. Модифицированная задача оптимального разворота КА (твердого тела), тем самым, решена полностью. Полученные таким способом кватернион $\mathbf{L}$ и векторы $\mathbf{w}, \mathbf{M}$ можно рассматривать как приближенное (квази-оптимальное) решение традиционной задачи опти-

мального разворота осесимметричного КА (твердого тела).

Следует отметить, что при сферической симметрии твердого тела квадрат модуля безразмерного управляющего момента традиционной задачи выражается через управляющие параметры и фазовые координаты модифицированной задачи следующим образом:

$$\mathbf{M}^2 = v_1^2 + f_1^2 g_1^2 + v_2^2. \quad (4.7)$$

Если в задаче оптимального разворота сферически-симметричного твердого тела векторы граничных условий по угловой скорости $\mathbf{w}_0, \mathbf{w}_T$ положить параллельными $\text{vect}(\tilde{\mathbf{L}}_0 \circ \mathbf{L}_T)$ (плоский эйлеров разворот твердого тела), то решения задач в традиционной и модифицированной постановках полностью совпадут. То же самое можно сказать и о случае, когда решение традиционной задачи оптимального разворота сферически-симметричного твердого тела получено в классе конических движений [9]. В этих случаях слагаемое $f_1^2 g_1^2$ в выражении (4.7) обращается в нуль и функционал (3.14) полностью переходит в функционал (1.5) традиционной задачи.

5. Численные примеры разворотов КА

В данном разделе на примере осесимметричного КА "Спейс Шаттл" [16], рассматриваемого как твердое тело, приводятся результаты численных решений задачи оптимального разворота в традиционной и модифицированной постановке для нескольких вариантов граничных условий по угловому положению и угловой скорости КА. На рис. 1, 2 представлена качественная картина изменения во времени компонент угловой скорости КА $w_i(t), i = \overline{1, 3}$, векторной части кватерниона ориентации КА $L_i(t), i = \overline{1, 3}$, и компонент вектора управляющего момента $M_i(t), i = \overline{1, 3}$.

На рис. 1 приведены результаты решения модифицированной задачи оптимального разворота КА. Расчеты проводились для значений:

$$I_1 = 3\,400\,648 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, I_2 = 21\,041\,672 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$I_3 = I_2 = 21\,041\,672 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \text{ или}$$

$$I_1 = 0,1967, I_2 = 1,2168, I_3 = I_2$$

(безразмерные моменты инерции);

$$\mathbf{L}_0 = (0,79505, 0,29814, -0,39752, 0,34783),$$

$$\mathbf{L}_T = (0,84434, 0,39846, -0,3260, 0,14848), \quad (5.1)$$

$$\mathbf{w}_0 = (0,27388, -0,23883, -0,3),$$

$$\mathbf{w}_T = (0, 0, -0,59). \quad (5.2)$$

Значения постоянных $\alpha_1, \alpha_2, c_1, \dots, c_6, c_8$, входящих в аналитическое решение задачи, таковы:

$$\alpha_1 = -0,04922, \alpha_2 = -0,03221, c_1 = 1,95809,$$

$$c_2 = -0,91029, c_3 = 1,43673, c_4 = -1,06099,$$

$$c_5 = -0,25889, c_6 = -0,28631, c_8 = -0,20819.$$

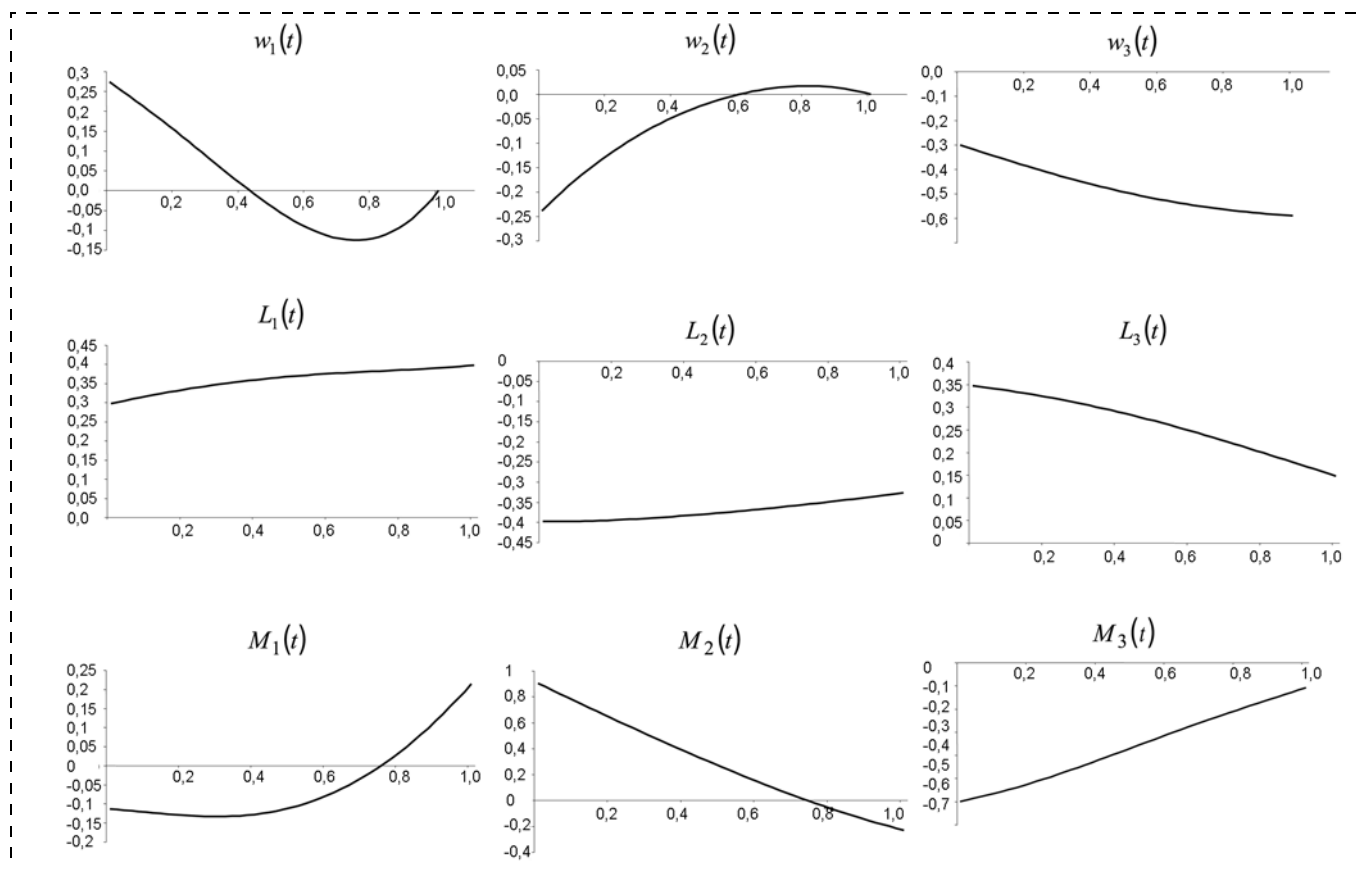


Рис. 1. Результаты решения модифицированной задачи (произвольные граничные условия)

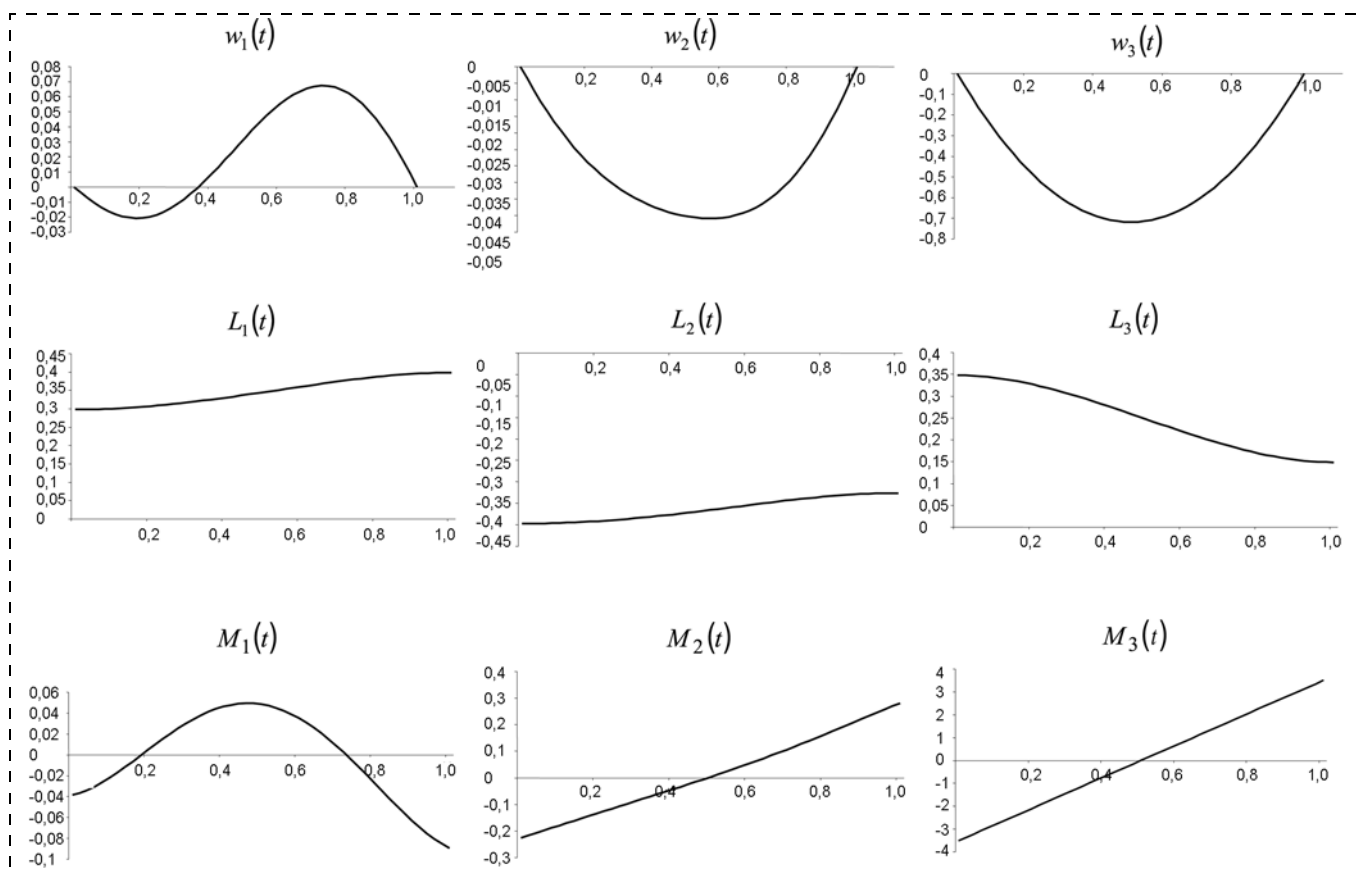


Рис. 2. Результаты решения модифицированной задачи (разворот из положения покоя в положение покоя)

Таблица 1

t		M_1		M_2		M_3	
Традиционная	Модифицированная	Традиционная	Модифицированная	Традиционная	Модифицированная	Традиционная	Модифицированная
0	0	-0,1556	-0,1132	0,8792	0,9044	-0,5955	-0,5984
0,5	0,5	-0,0780	-0,1102	0,2846	0,2613	-0,3644	-0,3649
$T = 1$	$T = 1$	0,1444	0,2141	-0,2897	-0,2282	-0,1065	-0,1077

Таблица 2

t		M_1		M_2		M_3	
Традиционная	Модифицированная	Традиционная	Модифицированная	Традиционная	Модифицированная	Традиционная	Модифицированная
0	0	0,0260	-0,0386	-0,2294	-0,2257	-3,4941	-3,4944
0,5	0,5	0,0	0,0485	-0,0012	0,0034	0,0001	0,0002
$T = 1$	$T = 1$	-0,0260	-0,0896	0,2978	0,2808	0,3489	0,3489

С граничными условиями (5.1), (5.2) с помощью универсальной программы численного решения краевой задачи оптимизации, полученной на основании принципа максимума и описанной в работах [13, 17], также решалась задача оптимального разворота КА в традиционной постановке (1.1)–(1.5). Графики решения двух задач практически совпали. Для примера в табл. 1 приведены значения компонент вектора $\mathbf{M}(t)$ на концах и в середине интервала времени движения КА $[0, 1]$ в этих двух решениях.

Значение функционала (1.5) для традиционной задачи в рассматриваемом примере составляет 0,35794. Значение того же функционала, вычисленного на основе решения модифицированной задачи, составляет 0,35898. Другими словами, в рассматриваемом примере расхождение между значениями функционала (1.5) для традиционной и модернизированной задачи составляет меньше 0,3 %. Это показывает близость значений оптимального момента, полученных при решении традиционной и модифицированной задач.

На рис. 2 приведены результаты решения модифицированной задачи оптимального разворота КА "Спейс Шаттл" в важном с практической точки зрения случае разворота из положения покоя в положение покоя. По формулам разделов 3, 4 расчеты проводились для граничных условий (5.1)

$$\mathbf{w}_0 = \mathbf{w}_T = (0, 0, 0). \quad (5.3)$$

Значения постоянных $\alpha_1, \alpha_2, c_1, \dots, c_6, c_8$, входящих в аналитическое решение задачи, таковы:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -0,01196, \alpha_2 = 0,00205, c_1 = -0,89182, \\ c_2 &= -11,47697, c_3 = -0,44591, c_4 = -5,73848, \\ c_5 &= 0,0, c_6 = 0,0, c_8 = 0,16941. \end{aligned}$$

Также с граничными условиями (5.1), (5.3) численно решалась задача оптимального разворота КА в традиционной постановке (1.1)–(1.5). Графики решения двух задач практически совпали. Для примера в табл. 2 приведены значения компонент век-

тора $\mathbf{M}(t)$ на концах и в середине интервала времени движения КА $[0, 1]$ в этих двух решениях.

Значение функционала (1.5) для традиционной задачи в рассматриваемом примере составляет 4,08727. Значение того же функционала, вычисленного на основе решения модифицированной задачи, составляет 4,08871. Таким образом, в рассматриваемом примере расхождение между значениями функционала (1.5) для традиционной и модернизированной задачи составляет меньше 0,033 %.

Следует отметить, что кватернион ориентации КА (твердого тела) $\mathbf{L}(t)$ может быть двузначным [1], т. е. $\mathbf{L}$ и $-\mathbf{L}$ соответствуют одному и тому же угловому положению КА в пространстве.

Заключение

Представленное в статье аналитическое квази-оптимальное решение задачи разворота осесимметричного КА (твердого тела) при произвольных граничных условиях может найти свое применение при построении систем управления КА, как и известное оптимальное аналитическое решение задачи, полученное в классе конических движений для частного случая граничных условий по угловой скорости КА [4].

Список литературы

1. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, 1973. 320 с.
2. Scrivener S. L., Thompson R. C. Survey of time-optimal attitude maneuvers // J. Guidance, Control, and Dynamics. 1994. Vol. 17, N. 2. P. 225–233.
3. Петров Б. Н., Боднер В. А., Алексеев К. Б. Аналитическое решение задачи управления пространственным поворотным маневром // Докл. АН СССР. 1970. Т. 192, № 6. С. 1235–1238.
4. Бранец В. Н., Черток М. Б., Казначеев Ю. В. Оптимальный разворот твердого тела с одной осью симметрии // Космич. исследования. 1984. Т. 22, Вып. 3. С. 352–360.
5. Сиротин А. Н. Оптимальное управление переориентацией симметричного твердого тела из положения покоя в положение покоя // Изв. АН СССР. МТТ. 1989. № 1. С. 36–47.

6. Молоденков А. В., Сапунков Я. Г. Новый класс аналитических решений в задаче оптимального разворота сферически симметричного твердого тела // Изв. РАН. МТТ. 2012. № 2. С. 16—27.
7. Молоденков А. В. Кватернионное решение задачи оптимального разворота твердого тела со сферическим распределением масс // Проблемы механики и управления. Сб. научн. трудов. Пермь: ПГУ, 1995. С. 122—131.
8. Молоденков А. В., Сапунков Я. Г. Аналитическое решение задачи оптимального в смысле комбинированного функционала разворота твердого тела в классе конических движений // Изв. РАН. МТТ. 2016. № 2. С. 3—16.
9. Молоденков А. В., Сапунков Я. Г. Решение задачи оптимального разворота сферически симметричного твердого тела при произвольных граничных условиях в классе обобщенных конических движений // Изв. РАН. МТТ. 2014. № 5. С. 22—34.
10. Сапунков Я. Г., Молоденков А. В. Алгоритм оптимального по энергии разворота космического аппарата при произвольных граничных условиях // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 8. С. 536—544.
11. Черноушко Ф. Л., Акуленко Л. Д., Соколов Б. Н. Управление колебаниями. М.: Наука, 1980. 383 с.
12. Челноков Ю. Н. Об осцилляторном и ротационном движении одного класса механических систем // Изв. АН СССР. МТТ. 1989. № 1. С. 28—35.
13. Молоденков А. В., Сапунков Я. Г. Решение задачи оптимального разворота осесимметричного космического аппарата с ограниченным и импульсным управлением при произвольных граничных условиях // Изв. РАН. ТиСУ. 2007. № 2. С. 90—105.
14. Молоденков А. В. К решению задачи Дарбу // Изв. РАН. МТТ. 2007. № 2. С. 3—13.
15. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Физматгиз, 1961. 391 с.
16. Li F., Bainum P. M. Numerical Approach for Solving Rigid Spacecraft Minimum Time Attitude Maneuvers // J. Guidance, Contr., and Dynamics. 1990. V. 13, N. 1. P. 38—45.
17. Сапунков Я. Г., Молоденков А. В. Численное решение задачи оптимальной переориентации вращающегося космического аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 6. Автоматическое и автоматизированное управление летательными аппаратами. 2008. № 6. С. 10—15.

Quasioptimal Algorithm of Turn of an Axially Symmetric Spacecraft under Arbitrary Boundary Conditions

Ya. G. Sapunkov, iptmuran@san.ru, A. V. Molodenkov, iptmuran@san.ru
Precision Mechanics and Control Problems Institute of RAS, Saratov, 410028, Russian Federation

Corresponding author: Molodenkov Aleksei V., Ph. D., Senior Researcher,
Laboratory of Mechanics, Navigation and Motion Control, Precision Mechanics
and Control Problems Institute, RAS, Saratov, 410028, Russian Federation, e-mail: iptmuran@san.ru

Accepted on August 31, 2017

The traditional problem of optimal turn in the sense of minimum of energy loss of an axially symmetric spacecraft as a rigid body under arbitrary boundary conditions on angular position and angular velocity of a spacecraft without constraint on the function of control is considered in the quaternion statement. The spacecraft reorientation time is arbitrary and fixed. Using substitutions of variables, the original problem is simplified (in terms of dynamic Euler equations) to the optimal slew problem for a rigid body with a spherical mass distribution. The simplified problem contains one additional scalar differential equation. In the class of generalized conical motions, the traditional optimal slew problem is modified to obtain analytical solutions for motion equations. The solutions contain arbitrary constants and two arbitrary scalar functions (generalized conical motion parameters). An optimization problem is formulated and solved with respect to these two functions, the second derivatives of which serve as controls in the optimization problem. The resulting analytical solution of the modified problem can be treated as an approximate (quasioptimal) solution of the traditional optimal slew problem under arbitrary boundary conditions. The quasioptimal algorithm of the optimal turn of a spacecraft is given. Numerical examples showing the closeness of the solutions of the traditional and modified optimal slew problems for an axially symmetric spacecraft are given.

Keywords: axially symmetric rigid body, spacecraft, optimal turn, quasioptimal solution, generalized conical motion, arbitrary boundary conditions

For citation:

Sapunkov Ya. G., Molodenkov A. V. Quasioptimal Algorithm of Turn of an Axially Symmetric Spacecraft under Arbitrary Boundary Conditions, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 847—855.

DOI: 10.17587/mau.18.847-855

References

1. Branets V. N., Shmyglevskij I. P. *Primenenie kvaternionov v zadachah orientacii tverdogo tela* (The Use of Quaternions in Problems of Orientation of Solid Bodies), Moscow, Nauka, 1973, 320 p. (in Russian).
2. Scriven S. L., Thompson R. C. Survey of Time-Optimal Attitude Maneuvers, *J. guidance, control, and dynamics*, 1994, vol. 17, no. 2, pp. 225—233.
3. Petrov B. N., Bodner V. A., Alekseev K. B. *Analiticheskoe reshenie zadachi upravleniya prostranstvennym povorotnym manevrom* (Analytical Solution of the Spatial Slew Manuever), *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1970, vol. 192, no. 6, pp. 1235—1238 (in Russian).
4. Branets V. N., Chertok M. B., Kaznacheev Yu. V. *Optimal'nyj razvorot tverdogo tela s odnoy osyu simmetrii* (Optimal Slew of a Solid Body with a Single Symmetry Axis), *Kosmicheskie Issledovaniya*, 1984, vol. 22, no. 3, pp. 352—360 (in Russian).
5. Sirotin A. N. *Optimal'noe upravlenie pereorientaciej simmetrichnogo tverdogo tela iz polozheniya pokoya v polozhenie pokoya* (Optimal Reorientation of a Symmetric Solid Body from a State of Rest to Another State of Rest), *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Mekh. Tverd. Tela*, 1989, no. 1, pp. 36—46 (in Russian).
6. Molodenkov A. V., Sapunkov Ya. G. A New Class of Analytical Solutions in the Optimal Turn Problem for a Spherically Symmetric Body, *Mech. Solids*, 2012, vol. 47, no. 2, pp. 167—177.
7. Molodenkov A. V. *Kvaternionnoe reshenie zadachi optimal'nogo v smysle minimuma energeticheskikh zatrat razvorota tverdogo tela* (Quaternion-Based Solution of the Energy Optimal Slew of a Solid Body), in *Collected Papers "Problems of Mechanics and Control"*, Perm Gos. Univ., Perm, 1995, p. 122—131 (in Russian).
8. Molodenkov A. V., Sapunkov Ya. G. Analytical Solution of the Optimal Attitude Maneuver Problem with a Combined Objective

Functional for a Rigid Body in the Class of Conical Motions, *Mech. Solids*, 2016, vol. 51, no. 2, pp. 135–147 (in Russian).

9. **Molodenkov A. V., Sapunkov Ya. G.** Solutions of the Optimal Turn Problem for a Spherically Symmetric Body under Arbitrary Boundary Conditions in the Class of Generalized Conical Motion, *Mech. Solids*, 2014, vol. 49, no. 5, pp. 495–505 (in Russian).

10. **Sapunkov Ya. G., Molodenkov A. V.** *Algoritm optimal'nogo po energii razvorota kosmicheskogo apparata pri proizvol'nyh granichnykh usloviyakh* (Algorithm for the Optimal Turn of a Spacecraft in the Sense of Minimal Energy Loss under Arbitrary Boundary Conditions), *Mexatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 536–544 (in Russian).

11. **Chernous'ko F. L., Akulenko L. D., Sokolov B. N.** *Upravlenie kolebaniyami* (Control of Oscillations), Moscow, Nauka, 1980, 383 p. (in Russian).

12. **Chelnokov Yu. N.** *Ob oscillyatornom i rotatsionnom dviglenii odnogo klassa mekhanicheskikh system* (About Oscillator and Rotational Motion of the One Class of Mechanic System), *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Mekh. Tverd. Tela*, 1989, no. 1, pp. 28–35 (in Russian).

13. **Molodenkov A. V., Sapunkov Ya. G.** A Solution of the Optimal Turn Problem of an Axially Symmetric Spacecraft with Bounded and Pulse Control under Arbitrary Boundary Conditions, *J. Computer and Systems Sciences International*, 2007, vol. 46, no. 2, pp. 310–323 (in Russian).

14. **Molodenkov A. V.** On the Solution of the Darboux Problem, *Mech. Solids*, 2007, vol. 42, no. 2, pp. 167–176 (in Russian).

15. **Pontryagin L. S., Boltyanskij V. G., Gamkrelidze R. V., Mishchenko E. F.** *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh processov* (The Mathematical Theory of Optimal Processes), Moscow, Nauka, 1961, 384 p. (in Russian).

16. **Li F., Bainum P. M.** Numerical Approach for Solving Rigid Spacecraft Minimum Time Attitude Maneuvers, *J. Guidance, Control, and Dynamics*, 1990, vol. 13, no. 1, pp. 38–45.

17. **Sapunkov Ya. G., Molodenkov A. V.** *Chislennoe reshenie zadachi optimal'noy pereorientatsii vrashhayushchegosya kosmicheskogo apparata* (Numerical Solution of Optimal Reorientation Problem of Rotating Spacecraft), *Mexatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2008, no. 6, pp. 10–15 (in Russian).

УДК 629.78

DOI: 10.17587/mau.18.855-861

В. Ф. Петрищев, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., mail@samspace.ru,
АО "Ракетно-космический центр "Прогресс", г. Самара

Энергосберегающее управление плоскостными параметрами орбиты геостационарного космического аппарата с помощью двигателя малой регулируемой тяги

Разработан энергосберегающий алгоритм управления плоскостными параметрами орбиты геостационарного космического аппарата с помощью двигателя малой регулируемой тяги. В результате математического моделирования и сравнения полученных затрат характеристической скорости с затратами, приведенными в технической литературе, показана эффективность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: вспомогательная система, заданная система, геостационарная орбита, коррекция орбиты, критерий качества, энергосберегающий алгоритм

Введение

Актуальность задачи обусловлена тем, что с течением времени гравитационные возмущения, действующие на геостационарный космический аппарат (ГСКА) со стороны Луны, Солнца и других планет, приводят к отклонениям в параметрах его орбиты и точки стояния. В связи с этим периодически необходимо проводить коррекцию орбиты и возвращать ГСКА в заданную точку стояния. Кроме того, в настоящее время все более актуальной становится задача удаления ГСКА, выведенных из эксплуатации (так называемый космический мусор), поскольку они представляют серьезную угрозу для функционирующих ГСКА. По идеологии работы [1] с экономической точки зрения мусор целесообразно собирать в одну точку геостационарной орбиты (ГСО). В связи с этой задачей особенно важным является вопрос о разработке энергосберегающего алгоритма коррекции параметров ГСО буксира, курсирующего от точки сбора космического мусора до новой цели и обратно.

Задача энергосберегающего управления технологическими установками и наземными транспортными средствами рассмотрена в работе [2]. В ней

предложен математический аппарат и алгоритмическое обеспечение, позволяющие решать задачи анализа оптимального управления объектами на множестве состояний функционирования. В качестве методов синтеза при этом используются принцип максимума, динамическое программирование и метод синтезирующих переменных. Отмечено, что затраты энергии при оптимальном управлении снижаются на 8...20 %.

Традиционно задача управления параметрами орбиты ГСКА решается с использованием либо импульсного управления, либо малой постоянной тяги. Во всех случаях применяются методы программного управления. Примером решения задачи управления плоскостными параметрами орбиты ГСКА с помощью двигателя малой нерегулируемой тяги, прикладываемой в трансверсальном направлении, является работа [3]. В ней предложен трехшаговый алгоритм управления периодом обращения, эксцентриситетом и долготой точки стояния. В настоящей работе поставлена и решена задача энергосберегающего управления плоскостными параметрами орбиты ГСКА с использованием двигателя малой регулируемой тяги.

Методология построения энергосберегающего алгоритма управления изложена в работе [4]. Здесь приводится краткое его описание. В силу особенностей решаемой задачи в настоящей работе этот алгоритм претерпел некоторые изменения.

1. Краткое описание энергосберегающего алгоритма управления

Пусть задана линейная по состоянию и управлению дискретная полностью управляемая система:

$$X_{i+1} = A_i X_i + B_i U_i, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (1.1)$$

где $X_i \in R^n$ — вектор состояния системы в n -мерном евклидовом пространстве в момент времени, соответствующий i ; $U_i \in R^r$ — вектор управлений в r -мерном евклидовом пространстве в тот же момент времени; A_i — матрица состояния системы размерности $n \times n$, зависящая от X_i ; B_i — матрица управлений размерности $n \times r$, также зависящая от X_i . Пусть также известно начальное состояние системы: $X_0 \neq 0$.

Требуется найти регулятор, вырабатывающий последовательность управлений $U_0, U_1, U_2, \dots, U_i, U_{i+1}, \dots$, на значения которых не наложены ограничения, переводящую систему из произвольного начального состояния в заданное конечное состояние (начало координат) $X = 0$ за неограниченное число шагов, и при этом минимизирующий заданный ниже показатель качества системы.

Пусть в нашем распоряжении имеется линейная по состоянию и управлению система, уравнение движения которой нам также известно:

$$\xi_{i+1} = C_i \cdot \xi_i + D_i \cdot U_i, \quad (1.2)$$

где $\xi_i \in R^n$ — вектор состояния системы, также принадлежащий n -мерному евклидовому пространству. Матрицы C_i и D_i имеют размерности матриц A_i и B_i соответственно и в общем случае могут зависеть от ξ_i . Назовем эту систему вспомогательной. Вспомогательная система управляется тем же вектором U_i , что и заданная система. Кроме того, потребуем, чтобы начальное состояние вспомогательной системы совпадало с начальным состоянием заданной системы: $\xi_0 = X_0$.

От матрицы C_i требуется, чтобы невозмущенное движение вспомогательной системы было асимптотически устойчиво в целом. Порядок выбора матрицы C_i изложен в работе [4], $D_i = -B_i$.

Закон управления с обратной связью выбирается в линейной форме:

$$U_{i+1} = U_i + P_{i+1}(\tilde{X}_{i+1} - \xi_{i+1}), \quad (1.3)$$

т. е. управление на текущем шаге определяется в виде алгебраической суммы управления на предыдущем шаге и взвешенной разности векторов состояния заданной и вспомогательной систем на текущем шаге. Здесь P_{i+1} — весовая матрица, оптимальным образом взвешивающая разность между векторами состояний заданной и вспомогательной

систем. Вектор состояния заданной системы определяется в результате измерений:

$$\tilde{X}_i = X_i + \varepsilon_i,$$

где X_i — истинное значение вектора состояния; ε_i — вектор случайных аддитивных погрешностей измерений.

Вводится по определению ковариационная матрица управления на текущем шаге управления:

$$K_{U, i+1} = M(U_{i+1} U_{i+1}^T). \quad (1.4)$$

Критерием (показателем) качества, как следует из названия алгоритма, является минимум энергозатрат на управление на каждом шаге. Определяется он через след ковариационной матрицы управления (сумму квадратов ее диагональных элементов), являющийся в соответствии с соотношением (1.3) функцией весовой матрицы:

$$\mathcal{J}(i) = M(U_{i+1}^T U_{i+1}) = \text{Tr}[K_{U, i+1}(P_{i+1})] \rightarrow \min, \quad (1.5)$$

где $\text{Tr}[\dots]$ — операция вычисления следа ковариационной матрицы управления $K_{U, i+1}$.

При такой постановке вспомогательная система играет роль ведущей системы, а заданная система — ведомой.

Решение приведенной оптимизационной задачи приводит к оптимальному выражению для весовой матрицы:

$$P_{i+1} = -K_{U, i}(B_i - D_i)^T [A_i K_{X, i} A_i^T + C_i K_{\xi, i} C_i^T + (B_i - D_i) K_{U, i} (B_i - D_i)^T + K_{\varepsilon}]^{-1} \quad (1.6)$$

и для ковариационной матрицы управления

$$K_{U, i+1} = [P_{i+1}(B_i - D_i) + E] K_{U, i} \quad (1.7)$$

на каждом интервале управления. Здесь

$$K_{X, i} = M(X_i X_i^T), \quad K_{\xi, i} = M(\xi_i \xi_i^T)$$

— ковариационные матрицы состояний заданной и вспомогательной систем, характеризующие дисперсии текущих отклонений состояний от поставленной цели движения. Их значения должны задаваться при проведении расчетов.

2. Особенности решения задачи синтеза управления плоскостными параметрами орбиты ГСКА

Как известно, продолжительность коррекции параметров орбиты ГСКА при использовании двигателя малой тяги составляет десятки суток, и в связи с этим при разработке энергосберегающего алгоритма дискретного управления тягой двигателя остро встает вопрос о выборе интервала (шага) дискретности работы алгоритма. С одной стороны, он должен быть достаточно большим, чтобы не создавать чрезмерной нагрузки на бортовой вычислительный комплекс. С другой стороны, он должен обеспечивать необходимую точность расчетов. В данной работе использован подход, изложенный

в работе [5]. В ней предложено новое представление вектора состояния КА в инерциальной системе координат (ИСК) в следующем виде, объединяющем вектор координат и вектор его приращения за шаг интегрирования Δt :

$$Q_i = \begin{pmatrix} X_i \\ \Delta X_i \end{pmatrix},$$

где $\Delta X_i = X_i - X_{i-1}$ — приращение вектора координат за один шаг.

Тогда уравнения движения центра масс КА в ИСК могут быть записаны в следующем виде:

$$\Delta X_{i+1} = \Delta X_i + \left(1 - \frac{1}{12} \Omega_0^2 \Delta t^2\right) a \Delta t^2,$$

$$X_{i+1} = X_i + \Delta X_{i+1}.$$

Здесь Ω_0 — значение текущей угловой орбитальной скорости, a — суммарный вектор ускорения КА от всех действующих на КА сил относительно ИСК, главными из которых являются сила притяжения Земли и малая сила тяги двигателя.

Этот подход позволяет вместо метода Рунге — Кутты четвертого порядка прогнозировать движение ГСКА по приведенным разностным соотношениям с шагом, равным 100 с, при сопоставимой точности расчетов.

Вторая особенность решения задачи состоит в том, что вспомогательная система (1.2), используемая для построения энергосберегающего алгоритма управления, принимается в виде

$$\xi_{i+1} = C_i \xi_0 + D_i U_i.$$

Здесь использована зависимость текущего вектора состояния вспомогательной системы ξ_{i+1} не от предыдущего ξ_i , а от начального состояния ξ_0 . Это позволяет использовать матрицу C_i в форме диагональной матрицы, диагональные элементы которой описывают динамику изменения по шагам соответствующего параметра состояния. Диагональные элементы применительно к данной четырехмерной задаче выбраны в форме гиперболических функций полиномов первого порядка от шага i дискретизации:

$$C_{11,i} = C_{44,i} = -1/(\cosh(-3 + i/600))^2;$$

$$C_{22,i} = C_{33,i} = 1 - (\tanh(-3 + i/600) + 1)/2.$$

Гиперболические функции ранее были успешно применены в задаче управления модулем тяги двигателей ракеты носителя "Союз 2-1в" [4].

Начальный вектор ξ_0 принят равным $\xi_0 = [3675,81; 3675,81; -26,81; 26,81]^T$ (здесь все элементы вектора измеряются в километрах). В результате использования приведенных значений параметров начального вектора и элементов переходной матрицы обеспечивается требуемая программа движения вспомогательной системы.

Далее, из практики моделирования энергосберегающего алгоритма [4] известно, что элементы

весовой матрицы в законе управления быстро сходятся. В связи с этим представляется целесообразным использовать весовую матрицу $P_i = P$ (1.6) в форме постоянной матрицы (с постоянными фиксированными элементами, соответствующими завершающему участку этапа моделирования):

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & 0 & P_{13} & 0 \\ 0 & P_{22} & 0 & P_{24} \end{bmatrix}; P_{11} = P_{22} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ Н/км};$$

$$P_{13} = P_{24} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Н/км}.$$

В дальнейшем разработка энергосберегающего алгоритма управления проведена с использованием этих особенностей.

3. Разработка энергосберегающего алгоритма управления плоскостными параметрами орбиты ГСКА

Используя в качестве переменных состояния заданной системы составляющие вектора $Q_{i+1} = [X, Y, \Delta X, \Delta Y]_{i+1}^T$, описывающие внутри плоскостное движение в ИСК, где X и Y — координаты центра масс ГСКА на одноименных осях ИСК, и их приращения на одном шаге по тем же осям, уравнения орбитального движения можно записать в виде (1.1):

$$Q_{i+1} = A_i Q_i + B_i U_i$$

или в развернутой матричной форме:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\mu s}{r^3} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\mu s}{r^3} & 0 & 1 \\ -\frac{\mu s}{r^3} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{\mu s}{r^3} & 0 & 1 \end{bmatrix}_i \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} -\frac{s}{m} & 0 \\ 0 & -\frac{s}{m} \\ -\frac{s}{m} & 0 \\ 0 & -\frac{s}{m} \end{bmatrix}_i \cdot \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix}_i.$$

Здесь $\mu = 3,986 \cdot 10^5 \text{ км}^3/\text{с}^2$ — потенциал гравитационного поля Земли; $s = \left(1 - \frac{1}{12} \Omega_0^2 \Delta t^2\right) \Delta t^2$; $r_i = (X_i^2 + Y_i^2)^{1/2}$; m — масса КА; U_x и U_y — составляющие тяги двигателя по соответствующим осям ИСК. Координаты центра масс ГСКА доступны измерениям.

Энергосберегающий алгоритм разработан для применения в дискретной системе управления с обратной связью, что предполагает вычисление на каждом шаге управления параметров отклонения от заданной цели. В данном случае целью является движущаяся по геостационарной орбите заданная точка стояния ГСКА. Движение точки стояния по орбите описывается матричным уравнением $Q_{ТС,i+1} = A_i Q_{ТС,i}$ с начальным значением вектора

$Q_{TC,0}$. Тогда, принимая в качестве вектора состояния заданной системы ее отклонение от точки стояния

$$X_{i+1} = Q_{i+1} - Q_{TC,i+1},$$

получим закон управления в форме (1.3):

$$\begin{aligned} U_{i+1} &= U_i + P[(\tilde{Q}_{i+1} - Q_{TC,i+1}) - \xi_{i+1}] = \\ &= U_i + P[(\Delta \tilde{Q}_{i+1} - \xi_{i+1})]. \end{aligned}$$

Здесь P — постоянная весовая матрица; $\tilde{Q}_{i+1} = Q_{i+1} + \varepsilon_{i+1}$ — результат измерений координат центра масс ГСКА, содержащих белый шум.

На каждом шаге управления проводится измерение текущих координат центра масс ГСКА и уточнение ковариационной матрицы управления в соответствии с формулой: $K_{U,i+1} = [P(B_i - D_i) + E]K_{U,i}$. Здесь E — единичная матрица размерности 2×2 . Начальная ковариационная матрица принята диагональной с элементами $K_{11,U,0} = K_{22,U,0} = 0,5H^2$.

Традиционно принимается $D_i = -B_i$, а начальный вектор управления принимается равным нулевому вектору.

Для оценки эффективности алгоритма путем сравнения с известными результатами его моделирование проведено с теми же начальными отклонениями параметров орбиты от заданных, обозначенных нижним индексом "з", которые приняты в ра-

боте [3] по периоду обращения T , эксцентриситету e и долготе λ точки стояния:

$$\Delta T = T - T_3 = 1000 \text{ с},$$

$$\Delta e = e - e_3 = 0,005,$$

$$\Delta \lambda = \lambda - \lambda_3 = 5^\circ.$$

Положим, что ГСКА в начальный момент времени находится в точке перигея своей орбиты [5]. Через эту точку проведем ось $OX_{ИСК}$, начало которой (точка O) совпадает с центром масс Земли. Из этого следует, что ГСКА в начальный момент опережает точку стояния. Его вектор состояния определяется следующими параметрами: $Q_0 = [42277,3; 0; 0; 307,82]^T_0$.

Здесь размерность элементов — километры. Отсюда видно, что орбита ГСКА выше геостационарной орбиты (42164 км) на 113,3 км. При этом трансверсальная скорость ГСКА в перигее равна 3,0782 км/с, что также превышает скорость на геостационарной орбите (3,0747 км/с) и определяет при шаге 100 с приведенное значение четвертой компоненты вектора состояния.

Начальный вектор состояния точки стояния на ГСО в этом случае равен $Q_{TC,0} = [42003,55; -3674,83; 26,8; 306,3]^T_0$. Начальное отклонение вектора состояния заданной системы от точки стояния определяется разностным вектором $\Delta Q_0 = Q_0 - Q_{TC,0} = [273,75; 3674,83; -26,8; 1,52]^T_0$.

Длительность процесса коррекции орбиты N также принята [2] равной 4000 шагов длительностью 100 с каждый, т. е. около 5 суток.

4. Результаты математического моделирования задачи

На рис. 1—6 представлены результаты моделирования энергосберегающей коррекции орбиты ГСКА. На рис. 1 приведены графики изменения компонент вектора состояния вспомогательной системы в процессе коррекции. При этом на каждом рисунке представлены графики изменения компонент как для случая невозмущенного, так и возмущенного движения системы. При возмущенном движении наблюдается небольшая колебательность при изменении параметра, в отличие от его плавного изменения при невозмущенном движении.

На рис. 2 показан процесс компенсации отклонений параметров орбиты ГСКА от параметров движущейся точки стояния на геостационарной орбите. Нетрудно заметить, что эти графики переходного процесса в известной степени с некоторым перерегулированием повторяют соответствующие графики движения вспомогательной системы, приведенные на рис. 1 соответственно.

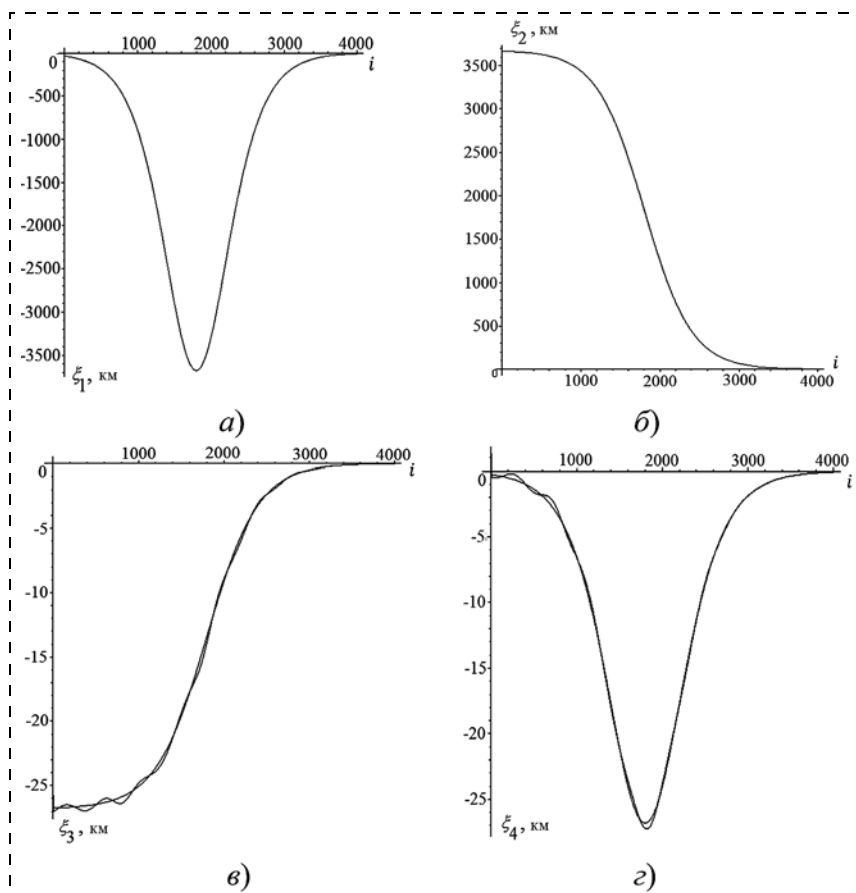


Рис. 1. Графики изменения компонент вектора состояния вспомогательной системы: а — ξ_1 ; б — ξ_2 ; в — ξ_3 ; г — ξ_4

В соответствии с концепцией построения энергосберегающего алгоритма управления [4], вспомогательная система является ведущей по отношению к заданной системе, являющейся ведомой. Согласно принятому в нем закону управления параметры движения ГСКА должны следовать за параметрами движения вспомогательной системы, что подтверждается приведенными графиками.

Из приведенных графиков следует, что в процессе коррекции выполнено важное условие равенства начальных значений вектора состояния вспомогательной и вектора отклонения заданной системы.

На рис. 3 приведены графики изменения составляющих вектора тяги двигателя по соответствующим осям ИСК для ГСКА с массой 100 кг. Составляющие вектора тяги в ИСК носят ярко выраженный гармонический характер и изменяются с двойной орбитальной, медленно уменьшающейся частотой со сдвигом по фазе на $1/4$ витка.

Изменение радиальной U_r и трансверсальной U_t составляющих вектора тяги двигателя в процессе коррекции ГСО показано на рис. 4. Их частота изменения близка к орбитальной частоте. Имеется тот же сдвиг по фазе колебаний.

На рис. 5 представлен график нарастания энергетических затрат на управление. Затраты оценивались по характеристической скорости в виде суммы приращений модуля вектора скорости центра масс ГСКА от действия тяги двигателя на каждом такте управления. Как известно, характеристическая скорость не зависит от массы ГСКА. Из графика видно, что в рассматриваемом случае отклонений начальных плоскостных параметров ГСКА от параметров движения заданной точки стояния на геостационарной орбите затраты характеристической скорости составили 9,4 м/с. В сравнимом случае применения трехшаговой схемы управления с использованием двигателя малой регулируемой тяги [3] эти затраты составили 11,8 м/с. Из этого следует, что применение энергосберегающего алгоритма управления в сочетании с двигателем малой регулируемой тяги позволило в данном случае сократить затраты на управление на 20 %.

Заметим, что если при тех же начальных отклонениях коррекция орбиты начинается в ее апогее,

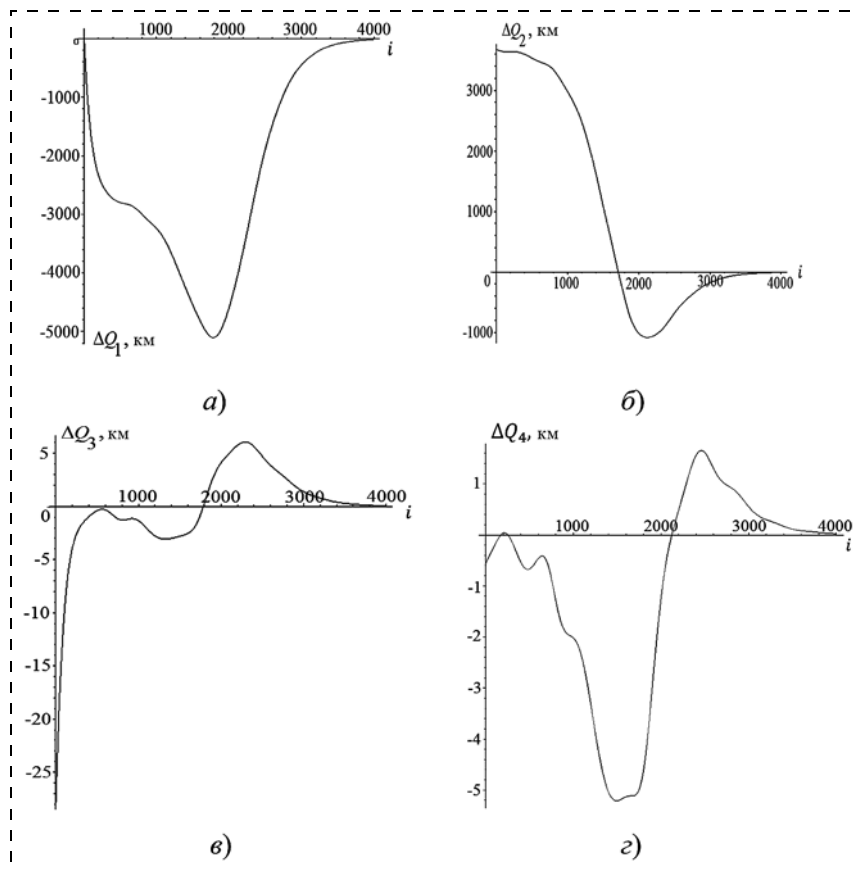


Рис. 2. Процесс компенсации отклонений параметров орбиты ГСКА от параметров движущейся точки стояния на геостационарной орбите:
а — ΔQ_1 ; б — ΔQ_2 ; в — ΔQ_3 ; з — ΔQ_4

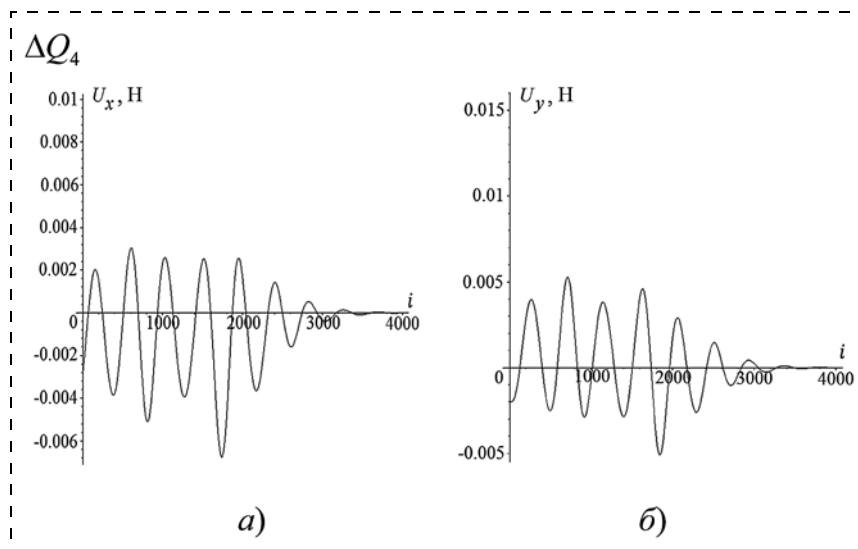


Рис. 3. Графики изменения составляющих вектора тяги двигателя по соответствующим осям ИСК для ГСКА с массой 100 кг:
а — U_x ; б — U_y

то потребная характеристическая скорость на коррекцию возрастает до 11,5 м/с.

Дополнительно исследовано влияние увеличения отклонения по долготе до 180° при сохранении отклонений по периоду и эксцентриситету орбиты.

Заключение

В статье разработан энергосберегающий алгоритм дискретного управления плоскостными параметрами орбиты геостационарного космического аппарата с помощью двигателя малой регулируемой тяги. Алгоритм разработан в соответствии с подходом, изложенным в работе [4] для дискретной системы с обратной связью. В процессе решения задачи использованы следующие особенности, отличающие ее от традиционного подхода:

- вектор состояния заданной системы принят в соответствии с работой [5] состоящим из вектора координат центра масс ГСКА и вектора его приращений на одном шаге расчетов, что позволило увеличить шаг дискретности работы системы до 100 с;
- вектор состояния вспомогательной системы на текущем шаге представлен зависящим от ее начального вектора состояния, что позволило использовать переходную матрицу вспомогательной системы в форме диагональной матрицы. Ее диагональные элементы выбраны в форме гиперболических функций полиномов первого порядка от номера шага расчетов;
- весовая матрица в законе управления выбрана в форме постоянной

матрицы, поскольку элементы весовой матрицы быстро сходятся к некоторым практически мало меняющимся значениям.

С учетом этих особенностей разработан алгоритм управления плоскостными параметрами ГСКА в форме системы с обратной связью и проведено его математическое моделирование.

Для оценки эффективности разработанного алгоритма было проведено сравнение результатов его моделирования с результатами, приведенными в работе [3], в которой предложен трехшаговый алгоритм управления плоскостными параметрами орбиты ГСКА с помощью двигателя малой нерегулируемой тяги, прикладываемой в трансверсальном направлении.

В результате моделирования подтверждена эффективность предлагаемого решения.

Список литературы

1. Бранец В. Н. Управление и навигация в задаче удаления космического мусора // Гироскопия и навигация. 2013. № 3 (82). С. 155—161.

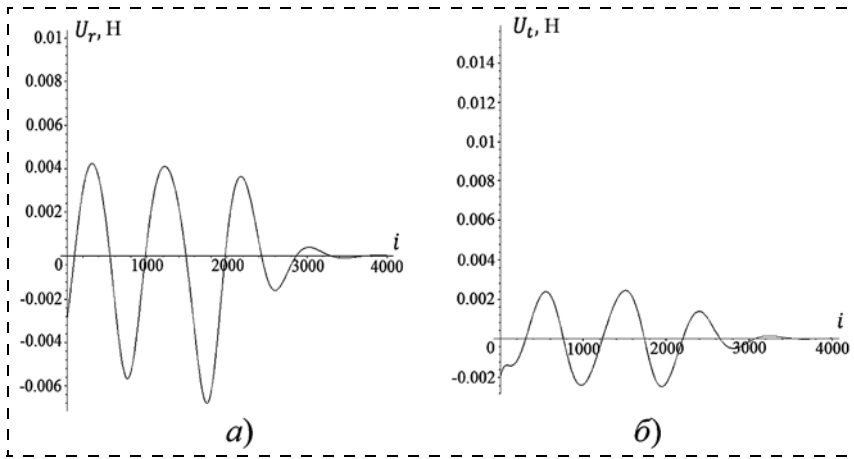


Рис. 4. Изменение радиальной U_r (а) и трансверсальной U_t (б) составляющих вектора тяги двигателя в процессе коррекции ГСО

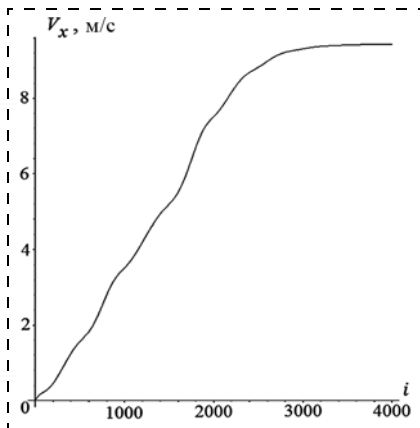


Рис. 5. График нарастания характеристической скорости V_x при коррекции геостационарной орбиты

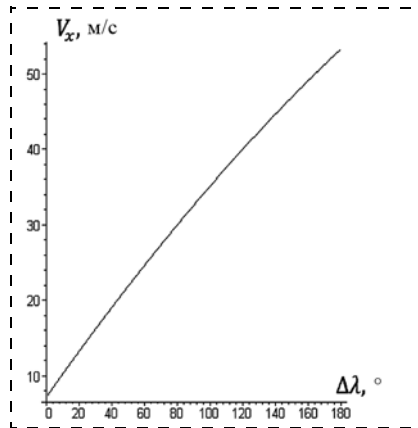


Рис. 6. Зависимость затрат характеристической скорости от отклонения по долготе

При этом при проведении расчетов соответственно изменялись: аргумент гиперболических функций в переходной матрице вспомогательной системы и длительность процесса (число тактов управления N). Результаты расчетов приведены в таблице.

Если значения V_x из приведенной таблицы аппроксимировать кривой второго порядка от шага i , то в результате статистической обработки по методу наименьших квадратов можно получить кривую затрат на управление в рассмотренных условиях в виде графика на рис. 6.

$\Delta\lambda, ^\circ$	Аргумент гиперболических функций	Число тактов управления	Длительность процесса, сутки	Затраты характеристической скорости, м/с
0	$i/400$	3000	3,47	6,7
5	$i/600$	4000	4,63	9,4
35	$i/800$	5000	5,79	17,4
65	$i/1000$	6000	6,94	25,8
95	$i/1200$	7000	8,10	33,8
125	$i/1400$	8000	9,26	41,3
155	$i/1600$	9000	10,42	48,5
180	$i/1800$	10000	11,57	53,0

2. Муромцев Д. Ю., Погонин В. А. Системы энергосберегающего управления: учеб. пособ. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. 92 с.

3. Салмин В. В., Четвериков А. С. Управление плоскими параметрами орбиты геостационарного космического аппарата с помощью двигателя малой тяги // Вестник Самарского аэрокосмического университета. 2015. Т. 14, № 4. С. 92—101.

4. Петрищев В. Ф. Энергосберегающее управление объектами ракетно-космической техники. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. 140 с.

5. Микрин Е. А., Михайлов М. В., Орловский И. В., Рожков С. Н., Семенов А. С. Автономная система навигации модернизированных кораблей "Союз" и "Прогресс" // XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сб. матер. Санкт-Петербург, 27—29 мая 2013 г. С. 304—309.

6. Чернявский Г. М., Бартенев В. А., Малышев В. А. Управление орбитой стационарного спутника. М.: Машиностроение, 1984. 144 с.

Power-Efficient Control of Plane Parameters of a Geostationary Spacecraft's Orbit Using an Adjustable Low-Thrust Rocket Engine

V. F. Petrishchev, mail@samspace.ru,

Progress Space-Rocket Centre, Samara, Korolev Research University of Samara

Corresponding author: Petrishchev V. F., D. Sc. Tech., Leading Researcher of Progress Space-Rocket Centre, Samara, Professor of Department of Theoretical Mechanics, Korolev Research University of Samara, e-mail: mail@samspace.ru

Accepted on August 25, 2017

A power-efficient algorithm is developed for discrete control of a geostationary spacecraft's orbital plane parameters using an adjustable low-thrust rocket engine. The algorithm is developed according to the approach described in [3] for a discrete feedback system. To reduce the onboard computer load, when the system operates during tens of days, the calculation interval is taken equal to 100 s. To use such a long interval, the author applied the approach described in [4], where the system state vector comprised the vector of coordinates of a geostationary spacecraft's centre of mass and the vector of its increments at one calculation step. A distinctive feature of the auxiliary system used for construction of the power-efficient control algorithm is the dependence of the current vector of the system state not from the previous one but from its initial state. That allowed using a transition matrix of the auxiliary system in the form of a diagonal matrix. The diagonal elements were taken in the form of hyperbolic first-order polynomials functions of the calculation step number. Besides, the weighting matrix in the control law was taken in the form of a constant matrix, since the elements of the weighting matrix in the control law quickly converge. To assess the efficiency of the algorithm proposed, the author compared results of its modeling to the results given in [2], where a three-step algorithm was proposed to control plane parameters of a geostationary spacecraft's orbit using a nonadjustable low-thrust rocket engine with the thrust applied in the transversal direction. The modeling was done with the same initial deviations of orbital parameters from the specified ones as those taken in [2]: for the revolution period the deviation was $\Delta T = 1,000$ s, for the eccentricity it was $\Delta e = 0,005$ and for the longitude of the orbital position it was $\Delta \lambda = 5$ deg. The orbit correction time was also taken, according to [2], equal to 4,000 steps of 100 s each, that is about 5 days. As a result of modeling, it was determined that the characteristic velocity consumption for correction of an orbit, with the correction beginning at the orbit perigee, was 9.4 m/s, which is 20 % less than that in the case given for comparison (11.8 m/s). If, with the same initial deviations, the correction of the orbit begins at its apogee, the characteristic velocity required for correction increases up to 11.5 m/s.

Keywords: auxiliary system, given system, geostationary orbit, orbit correction, performance criterion, power-efficient algorithm

For citation:

Petrishchev V. F. Power-Efficient Control of Plane Parameters of a Geostationary Spacecraft's Orbit Using an Adjustable Low-Thrust Rocket Engine, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 855—861.

DOI: 10.17587/mau.18.855-861

References

1. Branets V. N. *Upravlenie i Navigatsiya v Zadache Udaleniya Kosmicheskogo Musora* (Control and Navigation in the Problem of Space Debris Removal), *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2013, no. 3 (82), pp. 155—161 (in Russian).

2. Muromtsev D. Yu., Pogonin V. A. *Sistemy energosberegayushchego pravleniya* (Energy-efficient control systems), Tambov, Tamb. Gos. Techn. Univ. Publ., 2006, 92 p. (in Russian).

3. Salmin V. V., Chetverikov A. S. *Upravlenie Ploskimi Parametrami Orbitsy Geostatsionarnogo Kosmicheskogo Apparata s Pomoshchiu Dvigatela Maloy Tyagi* (Control of Plane Parameters of a Geostationary Spacecraft's Orbit Using a Low-Thrust Rocket Engine), *Vestnik Samarskogo Aerokosmicheskogo Universiteta*, 2015, vol. 14, no. 4, pp. 92—101 (in Russian).

4. Petrishchev V. F. *Energosberegayushchee Upravlenie Obyektami Raketno-Kosmicheskoy Tekhniki* (Power-Efficient Control of Space-Rocket Hardware), Samara, Publishing house of SamNTs RAN, 2017, 140 p. (in Russian).

5. Mikrin Ye. A., Mikhailov M. V., Orlovskiy I. V., Rozhkov S. N., Semyonov A. S. *Avtonomnaya Sistema Navigatsii Modernizirivannykh Korabley "Soyuz" i "Progress"* (Autonomous Navigation System of the Updated Soyuz and Progress Spaceship), *Proc. of the XX Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, May 27—29, 2013, Saint-Petersburg, pp. 304—309 (in Russian).

6. Chernyavskiy G. M., Bartenev V. A., Malyshev V. A. *Upravlenie Orbitoy Statsionarnogo Sputnika* (Control of a Stationary Spacecraft's Orbit), Moscow, Mashinostroyeniye, 1984, 144 p. (in Russian).

Указатель статей, опубликованных в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" в 2017 г.

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Анисимов Д. Н., Май Тхе Ань.** Динамические свойства нечетких систем управления, построенных на основе реляционных моделей. № 5.
- Афонин В. Л.** Вейвлет-преобразования в приложениях к анализу систем управления, содержащих существенные нелинейности. № 5.
- Быстров С. В., Васильев А. С., Вундер Н. А., Ушаков А. В.** Аналитическое конструирование последовательного компенсатора для систем управления техническим объектом с модуляциями. № 9.
- Воротников В. И., Вохмянина А. В.** К задаче линеаризации нелинейных управляемых систем посредством обратной связи. № 1.
- Воротников В. И., Мартышенко Ю. Г.** К задаче частичной устойчивости нелинейных дискретных систем. № 6.
- Жирабок А. Н., Шумский А. Е., Зуев А. В.** Подход к диагностированию линейных систем на основе скользящих наблюдателей. № 11.
- Иванников А. Д.** Формирование отладочного набора тестов для проверки функций цифровых систем управления объектами. № 12.
- Игумнов И. В., Куций Н. Н.** Алгоритм параметрической оптимизации автоматических систем с ШИМ-элементом, имеющим в своем составе нейронную сеть. № 4.
- Кабанов А. А.** Линеаризация обратной связью непрерывных и дискретных многомерных систем. № 6.
- Колесников А. А., Колесников Ал. А., Кузьменко А. А.** Метод АКАР и теория адаптивного управления в задачах синтеза нелинейных систем управления. № 9.
- Колосов О. С., Баларев Д. А., Пронин А. Д., Зуева М. В., Цапенко И. В.** Оценка частотных свойств динамического объекта с использованием импульсных тестирующих сигналов. № 4.
- Кулабухов В. С.** Синтез регуляторов для следящих систем на основе принципа изоморфности. № 8.
- Левский М. В.** Условия трансверсальности как эффективный инструмент в математических построениях оптимальных процессов. № 5.
- Ловчаков В. И.** Необходимые условия максимального быстрого действия линейных динамических систем. № 6.
- Потапов В. И.** Постановка и решение игровой задачи противоборства аппаратно-избыточной динамической системы с атакующим противником, действующим в условиях неполной информации в процессе конфликта. № 8.
- Семенов М. Е., Матвеев М. Г., Лебедев Г. Н., Соловьев А. М.** Стабилизация обратного гибкого маятника с гистерезисными свойствами. № 8.
- Сизых В. В., Шахтарин Б. И., Шевцев В. А.** Механизм срыва слежения в стохастических аналоговых системах фазовой автоподстройки первого и второго порядков. № 1.
- Феофилов С. В., Козырь А. В.** Современное состояние и перспективы развития теории релейных систем автоматического управления. № 9.
- Фуртат И. Б.** Алгоритмы скользящей аппроксимации. № 3.
- Хижняков Ю. Н., Южаков А. А.** Робастное управление объектом с экстремальной характеристикой в условиях неопределенности. № 2.
- Хубеев М. К.** Ресурсосберегающий пропорционально-интегральный регулятор. № 11.
- Чебурахин И. Ф., Гавриш О. Н.** Об эффективных методах синтеза булевых формул и схем из функциональных элементов. № 6.
- Якимов В. Н., Батищев В. И., Машков А. В.** Статистическая идентификация линейных динамических систем с использованием знакового аналого-стохастического квантования входного и выходного сигналов. № 9.

ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Челноков Ю. Н.** Теория кинематического управления движением твердого тела. № 7.
- Челноков Ю. Н.** Приложения теории кинематического управления движением твердого тела. № 8.

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Аль Аккад М. А., Абрамов И. В., Хворенков В. В.** Обратная кинематическая задача для управления амбидекстральными конечностями человекоподобного робота. № 1.
- Андреев В. П., Тарасова В. Э.** Определение формы препятствий мобильным роботом с помощью сканирующих угловых перемещений ультразвукового датчика. № 11.
- Борисов А. В., Кончина Л. В.** Сравнительный анализ алгоритмов управления экзоскелетом со звеньями переменной длины. № 4.
- Волосатова Т. М., Чичварин Н. В.** Комбинированная система технического зрения мобильных роботов. № 2.
- Воробьев В. В.** Алгоритмы выбора лидера и кластеризации в статическом рое роботов. № 3.
- Градецкий В. Г., Князьков М. М., Кравчук Л. Н., Крюкова А. А., Семенов Е. А., Суханов А. Н., Чашухин В. Г.** Управляемое формирование вакуума в устройствах сцепления с поверхностями при движении мобильных роботов с аэродинамическим прижимом. № 7.
- Градецкий В. Г., Ермолов И. Л., Князьков М. М., Кравчук Л. Н., Семенов Е. А., Суханов А. Н.** Силовое взаимодействие мобильного нагруженного робота с грунтом. № 12.
- Гулай А. В., Зайцев В. М.** Кодовое разделение логических каналов передачи транзакций в интеллектуальных мехатронных системах. № 5.
- Дашевский И. Н., Князьков М. М., Суханов А. Н.** Разработка алгоритмов управления полуавтоматическим ортезом. № 4.
- Джафаров С. М., Джафаров П. С., Мустафаева А. М.** Синтез оптимального нечеткого Т-S-регулятора для системы управления мобильным роботом с применением теории хаоса. № 9.
- Зенкевич С. Л., Назарова А. В., Хуа Чжу.** Моделирование и анализ движения группы мобильных роботов в среде ROS. № 5.
- Зенкевич С. Л., Хуа Чжу.** Управление движением группы роботов в строю типа "конвой". № 1.
- Казанцев В. Н., Павлов В. А.** Терминология и подходы к определению модульной структуры роботов. № 11.
- Карпова И. П.** К вопросу о представлении маршрута мобильного робота на основе визуальных ориентиров. № 2.
- Кодяков А. С., Павлюк Н. А., Будков В. Ю.** Исследование устойчивости конструкции антропоморфного робота Антарес при воздействии внешней нагрузки. № 5.
- Краснощеченко В. И.** Разработка и исследование математической модели гибкого однозвенного манипулятора с использованием принципа наименьшего действия Гамильтона. № 6.
- Краснощеченко В. И.** Синтез простого робастного регулятора для финитного управления гибким однозвенным манипулятором. № 10.
- Крахмалев О. Н., Петрешин Д. И., Крахмалев Г. Н.** Математические модели систем управления для калибровки ориентации инструмента промышленных роботов. № 10.
- Лавровский Э. К., Письменная Е. В.** Управление ходьбой экзоскелетона с использованием информации о программных моментах. № 3.
- Лесков А. Г., Селиверстова Е. В.** Алгоритм планирования и выбора способа захвата деформируемого объекта многопалым захватным устройством манипуляционного робота. № 11.
- Лопота А. В., Спасский Б. А.** Робототехника. Взгляд в будущее. № 9.
- Лохин В. М., Манько С. В., Александрова Р. И., Диане С. А. К., Панин А. С.** Механизмы самообучения в мультиагентных робототехнических группировках на основе эволюционного леса деревьев классификации. № 3.
- Лохин В. М., Манько С. В., Карпов С. А., Марголин И. Д.** Поведенческие механизмы обеспечения сетевой связи в мультиагентных робототехнических системах. № 12.

- Лютюв А. Г., Рябов Ю. В.** Синтез технологического процесса для роботизированного комплекса на основе знаний. № 10.
- Мотиенко А. И., Ронжин А. Л., Алтуний А. А., Крючков Б. И., Усов В. М.** Эвакуация космонавта в скафандре во время внекорабельной деятельности на поверхности Луны с участием аварийно-спасательных роботов. № 11.
- Подураев Ю. В.** Подход и опыт проектирования медицинской коллаборативной робототехники для лазерной хирургии и биопринтинга. № 11.
- Притыкин Ф. Н., Небритов В. И.** Виртуальное управление движением руки антропного робота с использованием базы знаний при синтезе перемещений с учетом положения запретных зон. № 7.
- Резчиков А. Ф., Кушников В. А., Иващенко В. А., Фоминых Д. С., Богомолов А. С., Филимонок Л. Ю.** Минимизация ущерба от нарушения технологического процесса в сварочных роботизированных технологических комплексах. № 5.
- Рудианов Н. А., Хрущев В. С.** Организация приобретения и формализации знаний интеллектуальных систем перспективных автономных РТК военного назначения в ходе опытно-войсковой эксплуатации дистанционно-управляемых комплексов. № 11.
- Рыбин И. А., Рубанов В. Г.** Математическая модель системы управления мобильного транспортного средства. № 5.
- Степанов Д. Н., Смирнова Е. Ю.** Метод коррекции оценки положения мобильного робота с использованием визуальной локации естественных ориентиров. № 11.
- Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю., Коноплин Н. Ю.** Система для автоматического выполнения манипуляционных операций с помощью подводного робота. № 8.
- Чернакова С. Э., Станкевич Л. А., Хлопин С. В., Нечаев А. И.** Взаимодействие оператора и роботов при обучении показом и телеуправлении гетерогенными робототехническими системами на основе модели формы движения. № 7.
- Шляхов Н. Е., Ватаманюк И. В., Ронжин А. Л.** Обзор методов и алгоритмов агрегации роя роботов. № 1.
- Ющенко А. С.** Коллаборативная робототехника: состояние и новые задачи. № 12.

СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

- Инсаров В. В., Сафонов В. А., Тихонова С. В.** Использование безэталонных метрик для оценки качества текущих изображений многообъектных стационарных наземных сцен. Часть 1. № 8.
- Инсаров В. В., Сафонов В. А., Тихонова С. В.** Использование безэталонных метрик для оценки качества текущих изображений многообъектных стационарных наземных сцен. Часть 2. № 10.

ОРГАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Кобзев А. А., Лекарева А. В.** Преодоление избыточности при решении задачи кинематики для руки оператора транспортного средства. № 1.
- Глазырин А. Е., Петухов И. В., Стешина Л. А.** Тренажеры виртуальной реальности: проблемы и перспективы использования в качестве средств подготовки оперативного персонала. № 11.
- Сергеев С. Ф.** Методологический базис проектирования симбиотических сред тренажеров мехатронных и робототехнических систем. № 12.

КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ

- Алиев Т. А., Мусаева Н. Ф., Сулейманова М. Т., Газызаде Б. И.** Чувствительные алгоритмы выявления степени развития неисправности штанговой глубинной насосной установки. № 2.
- Алилуев С. В., Большаков А. А., Попов А. Н., Тетерин Д. П.** Методики и алгоритмы контроля и диагностики привода системы управления автономного подвижного аппарата. № 4.
- Белоухов В. Н., Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Подлипов П. Е., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П.** Измерение ра-

диальных зазоров с повышенной чувствительностью в расширенном диапазоне осевых смещений рабочего колеса турбины. № 4.

- Большаков А. А., Ковалев В. В., Рубцов В. И.** Автоматизация диагностики дефектов сканеров оптико-локационных станций. Часть 1. № 3.
- Брякин И. В.** Магнитометр с тестовым алгоритмом функционирования. № 1.
- Будко А. Ю., Медведев М. Ю., Будко Р. Ю., Ивашин П. В., Твердохлебов А. Я., Герасимов Д. Н., Рахманов В. В.** Контроль параметров процесса сгорания в двигателе внутреннего сгорания по сигналу ионного тока. № 4.
- Бурьян Ю. А., Шалай В. В., Зубарев А. В., Поляков С. Н.** Динамическая компенсация виброактивных сил в колебательной системе. № 3.
- Гулай А. В., Зайцев В. М.** Интеллектуальные технологии оперативного функционального контроля многопараметрических систем. № 10.
- Мелентьев В. С., Батищев В. И., Сусова Е. А.** Повышение точности измерения параметров емкостных датчиков. № 6.

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

- Афонин С. М.** Параметрические структурные схемы пьезоактюаторов нано- и микроперемещений при продольном пьезоэффекте. № 2.
- Герман-Галкин С. Г., Гаврилов Р. С., Мустафаев Ю. Н.** Структурные и имитационные модели в модельно-ориентированном проектировании вентильного электропривода для ОПУ. № 1.
- Еременко Ю. И., Глущенко А. И., Петров В. А.** Об использовании нейросетевого настройщика для адаптации П регулятора скорости электропривода прокатной клетки. № 10.
- Моржов А. В., Моржова С. В.** Синтез релейного гидропривода при задании ограничений на параметрическую чувствительность его характеристик. № 6.
- Егоров О. Д., Буйнов М. А.** Исследование механизмов мехатронных устройств с помощью графов. № 2.

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

- Бобырь М. В., Кулабухов С. А., Якушев А. С.** Автономная система охлаждения режущего инструмента в задаче управления оборудованием с ЧПУ. Часть I. № 7.
- Бобырь М. В., Кулабухов С. А., Якушев А. С.** Автономная система охлаждения режущего инструмента в задаче управления оборудованием с ЧПУ. Часть II. № 8.
- Климина Л. А., Шалимова Е. С.** Двухпропеллерная ветроэнергетическая установка с дифференциальной планетарной передачей. № 10.
- Лепетухин К. Ю., Малолетов А. В., Брискин Е. С.** Об оптимальном управлении взаимным расположением секций дождевальной машины кругового действия при обработке некруглых полей. № 2.

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

- Андреев С. М., Галдин М. С.** Структурный синтез системы управляющего управления тепловым режимом валковой разливки стали. № 6.
- Долиненко В. В., Коляда В. А., Шаповалов Е. В., Скуба Т. Г.** Расчет устойчивых режимов МИГ/МАГ сварки корневых швов. № 9.
- Лютюв А. Г., Ишкулова А. Р.** Автоматизированная система экстрамального управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с многосекционными анодами. № 3.
- Саханский С. П.** Управление выращиванием кристаллов лейкосапфира. № 12.
- Соловьев Д. С., Мукина И. А., Литовка Ю. В.** Особенности оптимального управления гальваническими процессами в многоанодной ванне с различными значениями силы тока. № 9.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

- Городецкий В. И., Бухвалов О. Л. Самоорганизующиеся производственные В2В-сети. Часть 1. Концепция и базовые задачи. № 11.
- Городецкий В. И., Бухвалов О. Л. Самоорганизующиеся производственные В2В-сети. Часть 2. Архитектура и алгоритмическая поддержка. № 12.
- Романов М. П., Романов А. М., Каширская Е. Н., Холопов В. А., Харченко А. И. Новая архитектура систем управления исполнительного уровня для дискретного машиностроительного производства. № 1.

НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖУЩИМИСЯ ОБЪЕКТАМИ

- Гошин Е. В., Усеинова И. Р. Метод определения внешних параметров камеры по паре изображений с использованием дуальных кватернионов. № 4.
- Девятисильный А. С., Стоценко А. К. Исследование относительного продольного движения автомобилей в системе "лидер-ведомый". № 4.
- Корсун О. Н., Николаев С. В., Поплавский Б. К. Алгоритмы проверки правильности полетных данных и оценивания нелинейностей при идентификации аэродинамических коэффициентов самолетов. № 4.

УПРАВЛЕНИЕ В АВИАКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Александров А. Ю., Александрова Е. Б., Лапшин А. Е., Тихонов А. А. Электродинамическая стабилизация искусственного спутника Земли в режиме двухосной закрукки. № 5.
- Аминев Б. Д., Данилова С. К. Автоматизация управления движением морского подводного объекта по заданному маршруту на основе имитационного моделирования. № 3.
- Грачев А. Н., Курбатский С. А., Лебеденко Ю. И. Алгоритм оценки параметров морской качки в задачах повышения точности позиционирования луча корабельной радиолокационной станции. № 8.
- Гриняк В. М., Горошко О. А., Девятисильный А. С. Система экспертного оценивания и визуализации параметров траектории безопасного движения судна. № 2.
- Девятисильный А. С., Шурыгин А. В., Стоценко А. К. Аналитическое конструирование и численное исследование моделей определения движения на данных ГЛОНАСС. № 11.
- Дорожко В. М. Энергия системы "контур морского судна — аномальная волна". № 3.
- Кислицын Ю. Д., Хисматов И. Ф. Оценка вероятности визирования объектов при автоматическом выходе летательного аппарата на рубеж обнаружения. № 9.
- Корсун О. Н., Стуловский А. В., Канышев А. В. Анализ движения самолетов на закритических углах атаки: коррекция погрешностей бортовых измерений и моделирование отклоняемого вектора тяги. № 10.

- Любимов В. В., Куркина Е. В. Вероятность захвата в резонанс асимметричной капсулы при управляемом спуске в атмосфере Марса. № 8.
- Панкратов В. М., Барулина М. А. Сравнительный анализ различных подходов к расчету собственных частот чувствительных элементов МЭМС-гироскопов. № 3.
- Панкратов И. А. Эволюционный алгоритм минимизации затрат характеристической скорости на переориентацию орбиты космического аппарата. № 11.
- Петрищев В. Ф. Энергосберегающий алгоритм управления переориентацией космического аппарата по зашумленным измерениям. № 7.
- Петрищев В. Ф. Энергосберегающее управление плоскостными параметрами орбиты геостационарного космического аппарата с помощью двигателя малой регулируемой тяги. № 12.
- Распопов В. Я., Шведов А. П. Резервная бесплатформенная система ориентации на отечественных микромеханических инерциальных датчиках. № 10.
- Рачков М. Ю. Стохастическое управление внешней подвеской пожарного вертолета. № 9.
- Рябогин Н. В., Соколов В. Н., Задорожная Н. М. Комплексирование информации инерциальных измерительных блоков и звездных приборов на основании оценки вектора малого поворота. № 5.
- Сапунков Я. Г., Молоденков А. В. Алгоритм оптимального по энергии разворота осесимметричного космического аппарата в классе конических движений. № 2.
- Сапунков Я. Г., Молоденков А. В. Квазиоптимальный алгоритм разворота осесимметричного космического аппарата при произвольных граничных условиях. № 12.
- Солдаткин В. М., Солдаткин В. В., Крылов Д. Л. Теоретические основы построения системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока. № 7.
- Фомичев А. В., Ли Е. К. Аналитический алгоритм терминального управления пространственным движением КА при посадке на поверхность Луны. № 6.
- Фомичев А. В., Ли Е. К. Исследование точности аналитического решения задачи терминального наведения КА при посадке на поверхность Луны. № 7.
- Шибанов Г. П. Оценка степени обученности оператора для управления летательным аппаратом. № 7.
- Шибанов Г. П. Методический подход к процессу испытаний вооружения и военной техники в условиях ресурсных ограничений. № 2.

СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ В ОБЛАСТИ МЕХАТРОНИКИ И РОБОТОТЕХНИКИ

- Бобряков А. В., Зуев А. В., Кабанов А. А., Каталиннич Б., Пряничников В. Е., Стажков С. М., Филаретов В. Ф., Хомченко В. Г. Особенности и возможности использования сетевых технологий в учебном процессе и в научных исследованиях при подготовке инженерных кадров различного уровня. № 10.

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор З. В. Наумова.

Сдано в набор 28.09.2017. Подписано в печать 14.11.2017. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН1217. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.

Рисунок к статье А. С. Ющенко
«КОЛЛАБОРАТИВНАЯ РОБОТОТЕХНИКА: СОСТОЯНИЕ И НОВЫЕ ЗАДАЧИ»



а)



б)

Рис. 2. Антропоморфные роботы:
а – Геминиоид (Япония); б – Алиса (РФ)

Рисунки к статье В. Г. Градецкого, И. Л. Ермолова, М. М. Князькова,
Е. А. Семенова, А. Н. Суханова
«СИЛОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОБИЛЬНОГО НАГРУЖЕННОГО
РОБОТА С ГРУНТОМ»

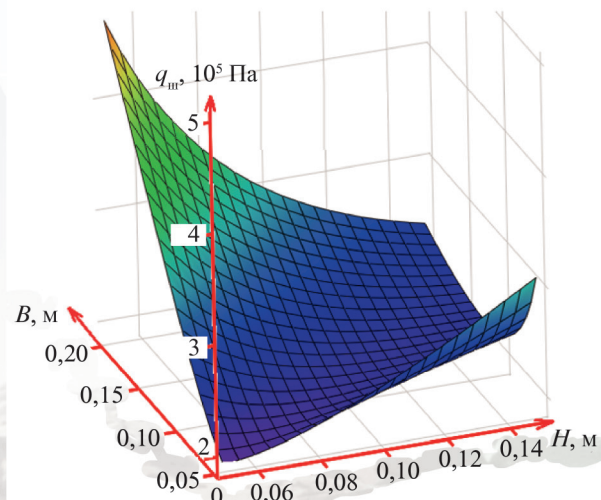


Рис. 4. Зависимость давления в пятне контакта
от геометрических параметров шины

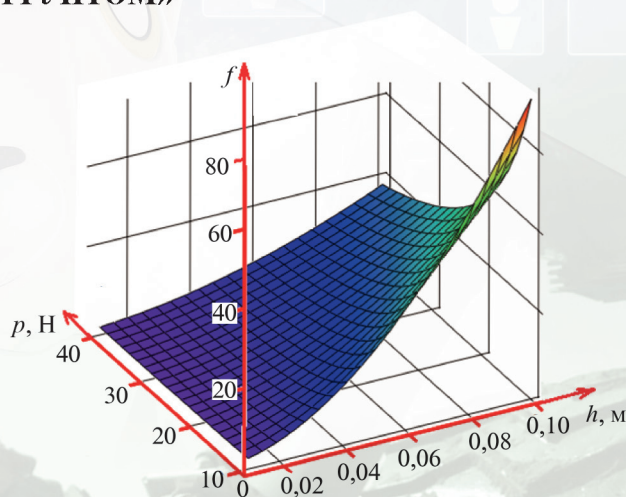


Рис. 5. Изменение коэффициента сопротивления
качению в зависимости от величины прогиба
и нагрузки на колесо

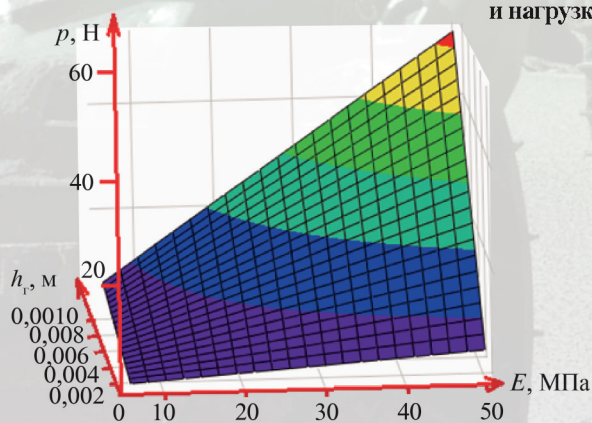
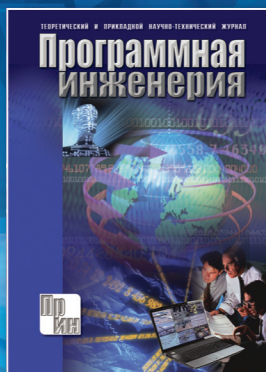


Рис. 6. Зависимость нагрузки на ось от деформации шины и типа грунта

Издательство “НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ” выпускает научно-технические журналы



Теоретический и прикладной научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 22765; «Пресса России» – 39795



Ежемесячный теоретический и прикладной
научно-технический журнал

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 72656; «Пресса России» – 94033



Научно-практический и учебно-методический журнал

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 79963; «Пресса России» – 94032



Ежемесячный междисциплинарный
теоретический и прикладной научно-технический журнал

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано- и микросистем в различные области науки, технологии и производства.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 79493; «Пресса России» – 27849

Все журналы
распространяются
только по подписке.

Оформить подписку можно
через подписные агентства
либо непосредственно
в редакции журналов.

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:
107076, Москва, Стромынский пер., 4. Издательство “НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ”
Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10.

E-mail: antonov@novtex.ru