

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ



Том 18
2017
№ 11



50 лет

**ГНЦ РФ Центральному
научно-исследовательскому
и опытно-конструкторскому
институту робототехники
и технической кибернетики**



Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики отмечает 50-летний юбилей. За время существования нашим коллективом пройден славный путь становления, расцвета, преодоления трудностей, выдающихся трудовых успехов и впечатляющих достижений. Созданы уникальные системы фотонной техники, не имеющие аналогов в мире. Разработаны перспективные образцы космической техники и прорывные космические технологии. Благодаря нашему участию в ликвидации последствий на Чернобыльской атомной электростанции и созданию мобильных роботов для обследования радиационной обстановки в робототехнике появилось новое направление – экстремальная робототехника, в котором наш коллектив до сих пор является бесспорным лидером. Разработанные нашими специалистами робототехнические комплексы радиационного контроля и разведки приняты на вооружение и снабжение Вооруженных Сил Российской Федерации, используются службами МЧС России. Мы заложили основы целой линейки малогабаритных разведывательных роботов нового поколения, которые используются в интересах силовых министерств и ведомств.

В настоящее время успешно выполняются разработки по созданию робота космического назначения для поддержки внекорабельной деятельности космонавтов. Реализуются проекты по созданию робототехнических аппаратов для глубоководных исследований. В интересах Минздрава России выполняются работы в области создания медицинской робототехники.

Уверен, что накопленный профессиональный опыт поможет нам и в дальнейшем воплощать в жизнь новые проекты и реализовывать крупномасштабные планы по созданию образцов перспективной техники для обеспечения обороноспособности и национальной безопасности нашего государства.

Директор-главный конструктор
ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, д-р техн. наук
А.В. Лопота



МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 18

2017

№ 11

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

- Хубеев М. К.** Ресурсосберегающий пропорционально-интегральный регулятор . . . 723
Жиравок А. Н., Шумский А. Е., Зуев А. В. Подход к диагностированию линейных систем на основе скользящих наблюдателей . . . 728

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

(по материалам международной научно-технической конференции
 "Экстремальная робототехника" — 2017)

- Мотиенко А. И., Ронжин А. Л., Алтунин А. А., Крючков Б. И., Усов В. М.** Эвакуация космонавта в скафандре во время внекорабельной деятельности на поверхности Луны с участием аварийно-спасательных роботов . . . 734
Лесков А. Г., Селиверстова Е. В. Алгоритм планирования и выбора способа захвата деформируемого объекта многопальным захватным устройством манипуляционно-го робота . . . 739
Казанцев В. Н., Павлов В. А. Терминология и подходы к определению модульной структуры роботов . . . 744
Подураев Ю. В. Подход и опыт проектирования медицинской коллаборативной робототехники для лазерной хирургии и биопринтинга . . . 749
Степанов Д. Н., Смирнова Е. Ю. Метод коррекции оценки положения мобильного робота с использованием визуальной локации естественных ориентиров . . . 752
Андреев В. П., Тарасова В. Э. Определение формы препятствий мобильным роботом с помощью сканирующих угловых перемещений ультразвукового датчика . . . 759
Рудианов Н. А., Хрущев В. С. Организация приобретения и формализации знаний интеллектуальных систем перспективных автономных робототехнических комплексов военного назначения в ходе опытно-войсковой эксплуатации дистанционно управляемых комплексов . . . 763

ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Глазырин А. Е., Петухов И. В., Стешина Л. А.** Тренажеры виртуальной реальности: проблемы и перспективы использования в качестве средств подготовки оперативного персонала . . . 767

МНОГООАГЕНТНЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Городецкий В. И., Бухвалов О. Л.** Самоорганизующиеся производственные В2В-сети. Часть I. Концепция и базовые задачи . . . 776

УПРАВЛЕНИЕ В АВИАКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Девятисильный А. С., Шурыгин А. В., Стоценко А. К.** Аналитическое конструирование и численное исследование моделей определения движения на данных ГЛОНАСС . . . 782
Панкратов И. А. Эволюционный алгоритм минимизации затрат характеристической скорости на переориентацию орбиты космического аппарата . . . 787

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. 11

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
 PSHIKHOPOV 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 prospective 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

- Khubeev M. K.** Resource Efficient Proportional-Integrated Controller 723
Zhirabok A. N., Shumsky A. E., Zuev A. V. Approach to Fault Diagnosis in Linear Systems by Non-Parametric Method 728

ROBOTIC SYSTEMS

(on the materials of the international scientific and technological conference "Extreme robotics (ER—2017)")

- Motienko A. I., Ronzhin A. L., Altunin A. A., Kryuchkov B. I., Usov V. M.** An Evacuation of a Cosmonaut in a Spacesuit During Extravehicular Activity on the Lunar Surface with Assistance of Rescue Robots 734
Leskov A. G., Seliverstova E. V. Algorithm for Planning and Selection of Deformable Object Grasp by Multi-Finger Gripper of Robotic Manipulator 739
Kazantsev V. N., Pavlov V. A. Terminology and Approaches to a Definition of Modular Robot Structure. 744
Poduraev Yu. V. Approach and Experience of Designing Medical Collaborative Robotics for Laser Surgery and Bio-Printing. 749
Stepanov D. N., Smirnova E. Yu. A Method of Mobile Robot Position Estimation Correction Using Visual Location of Natural Landmarks 752
Andreev V. P., Tarasova V. E. Determination of the Form of Obstacles by a Mobile Robot Using Scanning Angular Movements of Ultrasonic Sensor 759
Rudianov N. A., Khrushchev V. S. Organization of the Acquisition and Formalization of Knowledge of Intelligent Systems of Prospective Autonomous Military RTCs in the Course of Pilot Operation of Remote-Controlled Complexes 763

ERGATIC SYSTEM

- Glazyrin A. E., Petukhov I. V., Steshina L. A.** Virtual Reality Simulators: Problems and Perspectives of Using as a Means of Training Operational Personnel 767

MULTIAGENT PRODUCTION MANAGEMENT SYSTEM

- Gorodetsky V. I., Bukhvalov O. L.** Self-Organized B2B Production Networks. Part I. Concept and Basic Tasks 776

CONTROL IN AEROSPACE SYSTEMS

- Davyatisilny A. S., Shurygin A. V., Stotsenko A. K.** Analytical Design and Numerical Research of Motion Detection Models Based on GLONASS Data 782
Pankratov I. A. Evolutionary Algorithm for Minimizing the Characteristic Velocity for the Reorientation of the Spacecraft Orbit. 787

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

М. К. Хубеев, д-р техн. наук, проф., atp@pstu.ru,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Ресурсосберегающий пропорционально-интегральный регулятор

Предлагается подход для создания ресурсосберегающего пропорционально-интегрального регулятора, который способствует экономии ресурсов, повышает точность системы автоматического регулирования и увеличивает запасы устойчивости. Главное достоинство ресурсосберегающего пропорционально-интегрального регулятора — уменьшение объема работы, выполняемой исполнительным устройством. Алгоритмы апробированы на математических моделях объектов регулирования, отличающихся линейной частью и относительным запаздыванием.

Ключевые слова: регулятор, допуск, алгоритм, объект, ресурсосбережение, точность, устойчивость, передаточная функция, транспортное запаздывание, исполнительное устройство

Введение

Одной из актуальных задач развития техники и технологий является обеспечение ресурсосбережения, что обусловлено усилением конкуренции в условиях глобализации экономики. Ресурсосбережение может обеспечиваться за счет экономного расходования энергии и создания благоприятных условий функционирования технологического оборудования.

Самый распространенный подход к решению проблемы энергосбережения заключается в использовании систем, реализующих оптимальное по затратам энергии управление. Большинство задач решается с использованием методов математической теории оптимального управления (принцип максимума, динамическое программирование и др.). Различные стратегии и постановки задач оптимального управления с минимизируемыми функционалами, учитывающие затраты энергии, представлены в работе [1]. В ряде случаев для достижения энергосберегающего эффекта используются какие-либо особенности математической модели или режима функционирования объекта управления.

Рассмотрим некоторые работы, посвященные проблеме энергосбережения. В работе [2] получен алгоритм управления переориентацией космического аппарата, в котором учтена зашумленность измерений. Статья [3] посвящена энергосбережению на объектах энергетики, в работе [4] исследуется возможность использования переменного такта квантования для беспроводной передачи информации. В статье [5] предложены структурные схемы для оптимизации регуляторов в целях сокращения затрат энергии при переводе объекта из одного состояния в другое. Они применимы для объектов, модели которых содержат интегратор.

В этих работах исследуются различные объекты управления, они отличаются методами решения и полученными результатами. При этом все разработанные алгоритмы обладают одним свойством. Они не являются универсальными, т. е. примени-

мы лишь для конкретного рассматриваемого или сходных случаев.

В работе [1] отмечено, что "для получения алгоритмов энергосберегающего управления требуется проведение трудоемких исследований применительно к каждому новому объекту или новым режимам работы", что связано со значительными экономическими затратами. Поэтому на предприятиях химии и нефтепереработки, имеющих большое число объектов управления, обычно используются системы автоматического регулирования (САР) со стандартными регуляторами, при этом предпочтение отдается пропорционально-интегральному (ПИ) регулятору. Отметим, что возможности использования энергосберегающих технологий управления в этих отраслях ограничены не только экономическими соображениями, но и нестационарностью объектов управления из-за изменений состава и свойств перерабатываемого сырья, расходов технологических потоков и т. д. Это требует выработки новых подходов к энергосбережению.

Ресурсосбережение в САР

В настоящее время в недостаточной степени исследованы возможности обеспечения ресурсосбережения в самих САР. В этом случае использование универсальных ресурсосберегающих алгоритмов может обеспечить значительный экономический эффект, так как на крупных предприятиях химии и нефтепереработки функционируют тысячи САР. Однако значимых результатов в рассматриваемом направлении пока не получено. Об этом свидетельствует содержание обзорной статьи [6]. В подразделе "Развитие алгоритмов регулирования системы автоматизации" этой работы не рассматривается возможность создания ресурсосберегающих или энергосберегающих алгоритмов регуляторов. О существовании проблемы указано и в монографии [1]. В ней отмечено, что "сдерживающим фактором в реализации оптимального энергосберегающего управле-

ния динамическими процессами является отсутствие алгоритмов синтеза управляющих воздействий в реальном времени ... В каталогах алгоритмического и программного обеспечения отечественных и зарубежных фирм ... отсутствуют сведения об алгоритмах, минимизирующих затраты энергии".

Рассмотрим состояние этого вопроса в САР с ПИ регулятором. Ресурсосбережение можно обеспечить за счет сбережения энергии и экономии ресурса канала регулирования при более высокой точности регулирования технологического параметра и больших запасах устойчивости системы. Регулятор, обеспечивающий решение перечисленных задач, назовем ресурсосберегающим ПИ (РПИ) регулятором. В настоящее время в распределенных системах управления (РСУ) ведущих производителей отсутствует РПИ регулятор, обладающий перечисленными преимуществами по сравнению со стандартным ПИ регулятором.

В большинстве современных САР, как отмечено в работе [7], "единственным элементом контура, содержащим движущиеся части, является исполнительное устройство (ИУ) ... оно наиболее подвержено износу и коррозии ... ИУ является также и наиболее затратным элементом контура регулирования. На его долю приходится от 50 до 75 % капитальных затрат на контур регулирования и до 90 % затрат на ремонт и текущие расходы". Следовательно, ИУ можно считать механическим устройством, требующим значительных затрат ресурсов. Для экономии последних необходимо так изменить электронную часть САР (алгоритм функционирования регулятора), чтобы уменьшить объем работы, выполняемой ИУ. Таким образом, рассматриваемая задача является типичной для мехатроники.

Задача синтеза универсального РПИ регулятора для объектов регулирования (ОР) с транспортным запаздыванием достаточно сложна. Возможность ее решения возникла благодаря многократно возросшим возможностям вычислительной техники. Рассмотрим один из путей создания такого регулятора.

Сущность задачи синтеза РПИ регулятора

В работе [8] представлен универсальный энергосберегающий ПИ регулятор для САР с пневматическими ИУ. Попытки его дальнейшего совершенствования без введения дополнительных настроек не увенчались успехом. Анализ различных САР показал, что во многих случаях известен технологический допуск D , который может быть использован в качестве дополнительной настройки регулятора.

Представим выходной сигнал РПИ регулятора, учитывая технологический допуск D и алгоритм энергосберегающего ПИ регулятора из работы [8], в виде

$$u(t_i) = u(t_{i-1}) + a_f(d_i)u_E(t_i) + b_f(d_i)u_f(t_i), \quad (1)$$

где $(a_f(d_i), b_f(d_i)) \in R$, R — множество действительных чисел; $d_i = \varepsilon_d(t_i)/D$, t — время; $i \in N$, N — множество натуральных чисел; $t_i - t_{i-1} = h < h_m$ — период квантования; h_m — предельное значение такта

квантования, при котором цифровая система работает практически не хуже аналоговой; $u_E(t_i) = k_E(\varepsilon_d(t_i) - \varepsilon_d(t_{i-1}))$ — приращение пропорциональной составляющей управляющего воздействия; $u_f(t_i) = k_f(\varepsilon_d(t_i) + \varepsilon_d(t_{i-1}))$ — приращение интегральной составляющей управляющего воздействия; k_E, k_f, D и h — настроечные параметры регулятора; $\varepsilon_d(t_i) = \varepsilon(t_i) + v_i$ — измеренное значение ошибки регулирования; $\varepsilon(t_i) = g(t_i) - x(t_i)$ — ошибка регулирования; $v_i \in V$, V — множество, характеризующее ошибку измерений, обусловленные, в основном, шумом средства измерений и квантованием по уровню его выходного сигнала; $g(t_i)$ — задающее воздействие; $x(t_i)$ — выходной сигнал ОР. Для обозначения переменных, относящихся к РПИ регулятору, в необходимых случаях используется верхний индекс "r".

Выходной сигнал (1) отличается от выходного сигнала стандартного ПИ регулятора наличием коэффициентов $a_f(d_i)$ и $b_f(d_i)$. РПИ регулятор изменяет их значение относительно 1. Значения коэффициентов $a_f(d_i)$ и $b_f(d_i)$ зависят от q_c , где q_c — расчетное значение функции $Q(t_i)$, введенной в работе [9].

Система автоматического регулирования характеризуется:

1) точностью регулирования. В качестве показателей точности регулирования приняты максимальная ошибка регулирования ε_m (МОР) и сумма 10 наибольших ошибок регулирования ε_{m10} (НОР) на интервале моделирования. Точность регулирования тем выше, чем меньше МОР и НОР. Уменьшение этих показателей обеспечивает повышение качества продукции;

2) суммарным по модулю изменением сигнала на выходе регулятора u_Σ (СИСВР). С увеличением u_Σ возрастает расход сжатого воздуха, используемого пневматическим ИУ. Для придания регулятору ресурсосберегающих свойств необходимо уменьшить СИСВР по сравнению с ПИ регулятором. При этом уменьшится расход сжатого воздуха, а значит — и расход энергии на его подготовку. Уменьшение СИСВР приводит также к снижению объема работы, выполняемой ИУ, что способствует экономии ресурса ИУ. Опытные производственники считают, что для оценки экономии ресурса ИУ можно использовать следующее соотношение: при уменьшении u_Σ в два раза ресурс ИУ увеличится примерно на 20 %;

3) временем функционирования ИУ δt . Для линейной САР с ПИ регулятором δt в динамическом режиме равно времени эксплуатации (моделирования) Δt , так как управляющее воздействие изменяется на каждом такте квантования, а время отработки ИУ входного воздействия обычно больше такта квантования по времени. Если обеспечить выполнение условия $\delta t < \Delta t$, то ресурс ИУ будет расходоваться медленнее. Опытные производственники считают, что для оценки экономии ресурса ИУ можно использовать следующее соотношение: при выполнении условия $\delta t = 0,5\Delta t$ ресурс ИУ увеличится примерно на 12 %;

4) запасами устойчивости по амплитуде и фазе. В работе предполагается, что настройки сравниваемых регуляторов выбраны, и они одинаковы. Поэтому оценивалось изменение Δp параметра ОР p , которое приведет к потере устойчивости системы, $p \in P$, где P — множество номинальных значений параметров ОР. Увеличение запасов устойчивости САР уменьшает затраты на обслуживающий персонал, выполняющий настройку регуляторов.

Анализ соотношения (1) позволяет сделать следующий вывод: РПИ регулятор в целях сбережения энергии, экономии ресурса ИУ, повышения точности регулирования технологических параметров и увеличения запасов устойчивости системы изменяет коэффициенты $a_i(d_i)$ и $b_i(d_i)$ относительно значения, равного 1.

Алгоритм регулятора

Основываясь на вышеизложенном, постановку задачи синтеза РПИ регулятора можно сформулировать следующим образом.

Найти алгоритм изменения коэффициентов $a_i(d_i)$ и $b_i(d_i)$, который обеспечит для заданных параметров ОР p , настроечных параметров регулятора k_E, k_I, D и h , случайного возмущающего воздействия $f \in F$, где F — множество возмущающих воздействий, интервала времени $\Delta t \in T$, где T — множество интервалов времени эксплуатации (моделирования), и ошибок измерений v_i существенное (в идеальном случае максимальное) уменьшение u_Σ при ограничениях $\varepsilon_m^r < \varepsilon_m$, $\varepsilon_{m10}^r < \varepsilon_{m10}$, $\Delta p^r \geq \Delta p$.

Данная задача, скорее всего, аналитического решения не имеет. Поэтому исследована возможность применения ситуационного подхода.

Сущность предлагаемой методики заключается в разбиении бесконечного множества ситуаций S на три основные группы:

1) ситуации $s \in S_1$, $S_1 \subset S$, в которых на очередном такте квантования управляющее воздействие не изменяется, т. е. $a_i(d_i) = 0$ и $b_i(d_i) = 0$. За счет этого обеспечивается уменьшение СИСВР;

2) ситуации $s \in S_2$, $S_2 \subset S$, характеризующиеся тем, что для формирования управляющего воздействия применяется функция $Q(t_i)$. В общем случае $a_i(d_i) \neq b_i(d_i)$, а значения этих коэффициентов связаны пропорциональной зависимостью с q_c ;

3) ситуации $s \in S_3$, $S_3 \subset S$, в которых на очередном такте квантования управляющее воздействие изменяется по стандартному ПИ алгоритму, т. е. $a_i(d_i) = 1$ и $b_i(d_i) = 1$. К ним относятся ситуации, когда не выполняются условия, характеризующие первую и вторую группы ситуаций.

Ввод в действие РПИ регулятора предполагает осуществлять следующим образом: проводится настройка канала регулирования с ПИ регулятором, после чего включается РПИ регулятор.

Основные результаты

Для оценки эффективности РПИ регулятора выполнены вычислительные эксперименты для семи различных моделей ОР (ОР1 — ОР7), описанных в работе [8].

Рассматриваются САР, функционирующие в стабилизирующем режиме (задающее воздействие не изменяется) при следующих условиях:

- технологический допуск D принят равным максимальной ошибке регулирования в САР с ПИ регулятором;
- оптимальные по точности настройки регуляторов, период квантования и случайное возмущающее воздействие, действующее на вход ОР, выбраны в соответствии с работой [8];
- моделирование выполнялось на временном интервале Δt , составляющем более 1000 периодов колебаний на доминирующей частоте САР с ПИ регулятором, что позволило получить результаты, близкие к вероятностным.

Результаты сравнительного анализа САР с ПИ и РПИ регуляторами представлены в табл. 1. Проведем анализ результатов на примере строки 3 таблицы.

Объем работы, выполняемый ИУ в САР с ПИ регулятором в 1,318 раза больше, чем в САР с РПИ регулятором. Это обеспечивает энергосбережение и экономию ресурса ИУ. Данный факт демонстрирует рис. 1 (необходимо сравнить амплитуды сигналов на выходах регуляторов). Отметим, что рассматриваемая характеристика является интегральной, положительный эффект обусловлен принципом дей-

Таблица 1

Сравнительная оценка САР с ПИ и РПИ регуляторами в линейном случае

№ п/п	Объекты регулирования	Результаты моделирования			
		СИСВР	Точность регулирования		Время функционирования ИУ
		u_Σ / u_Σ^r	$\varepsilon_m / \varepsilon_m^r$	$\varepsilon_{m10} / \varepsilon_{m10}^r$	$\delta t^r / \delta t$
1	ОР1	1,164	1,204	1,137	0,537
2	ОР2	1,318	1,191	1,185	0,157
3	ОР3	1,318	1,302	1,292	0,312
4	ОР4	1,280	1,229	1,128	0,258
5	ОР5	1,358	1,216	1,150	0,234
6	ОР6	1,242	1,247	1,251	0,352
7	ОР7	1,275	1,237	1,157	0,251

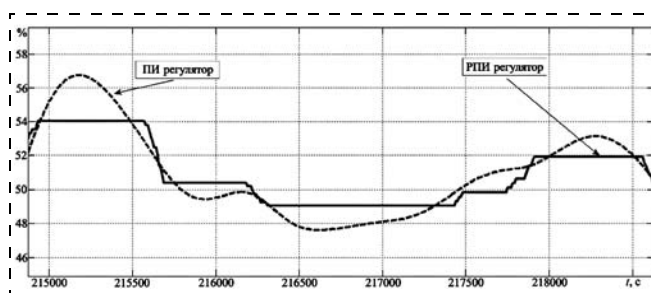


Рис. 1. Фрагмент зависимости сигнала на выходах регуляторов (% открытия клапана) на временном интервале

ствия РПИ регулятора, поэтому результаты всегда положительны.

Анализ точности регулирования показывает, что значение МОР в САР с ПИ регулятором в 1,302, а НОР — в 1,292 раз больше, чем в САР с РПИ регулятором. Относительное время функционирования ИУ составляет 0,312, за счет чего следует ожидать увеличения ресурса ИУ на 18 %. Уменьшение времени функционирования ИУ с САР с РПИ регулятором демонстрирует рис. 1. Видно, что в течение значительных отрезков времени сигнал на выходе РПИ регулятора не изменяется.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что по сравнению с работой [8] преимущества по u_{Σ} выше в среднем в 1,75 раз, по МОР — в 1,2 раза и по среднему времени функционирования ИУ — в 1,30 раза. Эти данные свидетельствуют о существенных преимуществах РПИ регулятора по сравнению с энергосберегающим ПИ регулятором.

Значимым преимуществом является также увеличение запасов устойчивости САР. Преимущества по этому показателю меньше, чем в работе [8], но достаточны для того, чтобы обеспечивать приемлемое качество регулирования при значениях параметров ОР, соответствующих границе устойчивости САР с ПИ регулятором, что демонстрирует фрагмент на рис. 2. Фрагмент получен при увеличении коэффициентов передачи ОР до значений, соответствующих границе устойчивости САР с ПИ регулятором. Видно, что благодаря использованию в САР РПИ регулятора, удастся уменьшить МОР более чем в 5 раз.

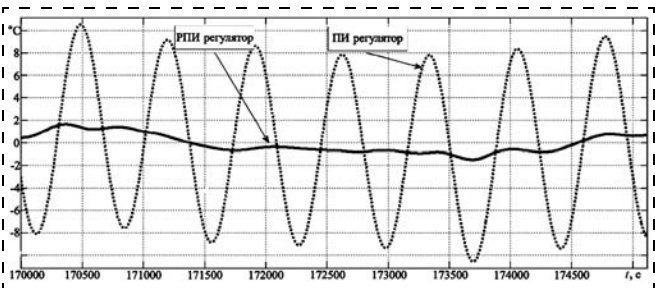


Рис. 2. Фрагмент изменения ошибок регулирования на временном интервале

Таблица 2

Сравнительная оценка САР с ПИ и РПИ регуляторами в различных режимах

№ п/п	Результаты моделирования			
	СИСВР	Точность регулирования		Время функционирования ИУ
	u_{Σ}/u_{Σ}^r	$\varepsilon_m/\varepsilon_m^r$	$\varepsilon_{m10}/\varepsilon_{m10}^r$	$\delta t^r/\delta t$
1	1,344	1,255	1,150	0,348
2	1,324	1,240	1,184	0,357
3	1,427	1,179	1,040	0,373
4	1,295	1,333	1,170	0,352
5	1,628	1,111	1,118	0,260
6	1,408	1,014	1,017	0,285
7	1,427	1,274	1,140	0,309

Рассмотрим особенности функционирования РПИ регулятора в различных режимах на примере САР с ОРЗ, который можно считать типичным объектом с самовыравниванием. Вычислительный эксперимент выполнялся при условиях, соответствующих табл. 1, с учетом наличия нелинейных элементов и апериодического фильтра:

- люфт ИУ составляет 1 % от диапазона изменения управляющего сигнала $u(t_i)$;
- шум на выходе средства измерения представляет собой дискретный нормально распределенный случайный сигнал с математическим ожиданием, равным нулю, и среднеквадратичным отклонением σ . В соответствии с современным уровнем техники выбрано $3\sigma = 1\%$ от диапазона изменения ошибки регулирования $\varepsilon(t_i)$;
- шаг квантования сигнала на выходе средства измерения составляет 1 % от диапазона изменения $\varepsilon(t_i)$;
- шаг квантования сигнала на входе ИУ составляет 0,2 % от диапазона изменения управляющего сигнала $u(t_i)$. Эта величина характеризует суммарное влияние ошибок аналого-цифрового преобразования и зону нечувствительности ИУ;
- параметры апериодического фильтра выбраны такими, при которых в САР с ПИ регулятором обеспечивается минимальное значение СИСВР. Результаты моделирования представлены в табл. 2:
- в строке 1 представлены результаты для приведенных выше условий;
- в строках 2—4 приведены результаты, полученные при последовательном увеличении в три раза параметров, характеризующих нелинейные элементы: люфта ИУ, шума измерений и шага квантования сигнала на выходе средства измерения. Видно, что при ухудшении условий эксплуатации преимущества РПИ регулятора практически не изменяются (по среднему значению для рассмотренных случаев). Если параметры нелинейных элементов уменьшать, то результаты будут приближаться к значениям, представленным в табл. 1 (строка 3);
- выполнено исследование влияния настроек регулятора. На практике часто используются "слабые" настройки. В строках 5—7 табл. 2 показаны результаты при уменьшении настроек регулятора k_E и k_I в два раза и увеличении технологического допуска в два раза. При этом возрастают преимущества по u_{Σ} и уменьшаются по значениям МОР и НОР.

Таким образом, преимущества РПИ регулятора сохраняются в различных режимах эксплуатации. В некоторых случаях они весьма значимы. Так, строка 5 свидетельствует о том, что объем работы, выполняемый ИУ в САР с ПИ регулятором в 1,628 раз больше, чем в САР с РПИ регулятором. При этом время функционирования ИУ составляет лишь 26 % от времени моделирования (эксплуатации). Отметим также, что рассмотренные преимущества достигаются при более высокой точности регулирования.

Заключение

Представленные результаты моделирования подтверждают высокую эффективность РПИ регулятора как по сравнению с ПИ регулятором, так и по сравнению с энергосберегающим ПИ регулятором. Комплексное решение задачи по улучшению основных технических характеристик ПИ регуляторов определяет практическую ценность работы. Создан алгоритм, который гарантированно сокращает энергетические затраты, экономит ресурс ИУ, повышает точность регулирования и увеличивает запасы устойчивости САР.

Выполненная оценка эффекта от внедрения РПИ регулятора показывает, что для нормальных условий эксплуатации (строка 1 табл. 2) экономия сжатого воздуха составит 17,2 %, а ресурс ИУ, который является наиболее затратным элементом САР, увеличится более чем на 20 %. В некоторых случаях экономический эффект существенно возрастает, например, для варианта, представленного в строке 5 табл. 2.

Руководящие работники предприятий, имеющих сотни, а иногда и тысячи каналов регулирования с ПИ регуляторами, заинтересованы в существенной экономии материальных ресурсов. Поэтому оснащение РСУ функцией ресурсосбережения является актуальной задачей. Вполне вероятно, что в ближайшей перспективе регуляторы, не обеспечивающие ресурсосбережение, потеряют конкурен-

тоспособность. Производители РСУ, которые не будут уделять этому вопросу должного внимания, могут понести существенные экономические потери. Внедрение РПИ регулятора отечественными производителями позволит повысить конкурентоспособность их продукции, что будет способствовать решению проблемы импортозамещения.

Список литературы

1. Матвейкин В. Г., Муромцев Д. Ю. Теоретические основы энергосберегающего управления динамическими режимами установок производственно-технического назначения. М.: Изд-во машиностроения 1, 2007. 128 с.
2. Петрищев В. Ф. Энергосберегающий алгоритм управления переориентацией космического аппарата по зашумленным измерениям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 7. С. 474–483.
3. Raj C. T., Srivastava S. P., Agarwal P. Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor // International Journal of Computer and Electrical Engineering. 2009. Vol. 1, N. 1. P. 61–70.
4. Hensel B. et al. A simple PI controller tuning rule for sensor energy efficiency with level-crossing sampling // Systems, Signals and Devices (SSD), International Multi-Conference. 2012. P. 243–248.
5. Жмудь В. А., Касторный А. В. Концепция энергосберегающих регуляторов // Автоматика и программная инженерия. 2013. № 4. С. 14–21.
6. Ицкович Э. Л. Современные тенденции развития автоматической части систем управления технологическими процессами // Датчики и системы. 2015. № 11. С. 68–76.
7. Беспалов А. В., Харитонов Н. И. Системы управления химико-технологическими процессами. М.: ИКЦ "Академкнига", 2007. 690 с.
8. Хубеев М. К. Энергосберегающий ПИ-регулятор // Автоматизация в промышленности. 2015. № 3. С. 37–39.
9. Хубеев М. К. Энергосберегающий пропорционально-интегральный регулятор // Энергобезопасность и энергосбережение. 2014. № 5. С. 29–33.

Resource Efficient Proportional-Integrated Controller

M. K. Khubeev, atp@pstu.ru✉,

Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614000, Russian Federation

Corresponding author: Khubeev Mars K., D. Sc., Professor,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614000, Russian Federation
e-mail: atp@pstu.ru

Accepted on August 07, 2017

Proportional-integral (PI) controllers are used for continuous control of technological processes' parameters. Algorithms of PI-controllers have not undergone fundamental changes over the past decade. Manufacturers do not propose controllers that exceed the standard PI-controller on several key technical characteristics, which include expense of energy and resources, accuracy of control and stability margin. Therefore, this article offers resource-efficient PI-controller. Its use allows to achieve the following objectives: to save energy and resources, to improve automatic control accuracy and to increase the stability margin. A universal energy-efficient PI-controller is put as a basis of this design. Manufacturing tolerances are used to improve its technical characteristics. Situational approach is applied in solving the problem. Computational experiments were carried out for the seven known models of objects of control with the transport delay to assess the effectiveness. In the linear case the superiority of resource-efficient PI-controller compared with energy-efficient PI-controller is characterized by the following results:

- the summary changing of the output of controller (modulo) decreases on average 1,75 times. This helps to save energy and resources of actuator;
- the error of maximum control is reduced by an average of 1,2 times, thereby increasing the quality of products;
- an average operation time of the actuator is decreased by an average of 1,3 times. This ensures resources savings of the actuator.

The following fact indicates the increase of stability margin: if the coefficients of transmission of control objects increased to values when the automatic control system with PI-controller is at the limit of stability, then continuous oscillations are observed in the automatic control system with PI-controller. Herewith an acceptable quality of control is realized in the automatic control system with a resource-efficient PI-controller, since the maximum control error is less in 5 times. The benefits of resource-efficient PI-controller are preserved in a variety of operating conditions — in the presence of nonlinear elements and the various controller setting. The presented results confirm the high efficiency of resource-efficient PI-controller compared with both PI-controller and energy-efficient PI-controller. Comprehensive solution of improvement problem of the basic technical characteristics of the PI-controller determines the practical value of the work. Companies of chemical and related industries are interested in the use of controllers to enhance the effectiveness of automatic control systems.

Keywords: controller, tolerance, algorithm, object, resource-efficient, accuracy, stability, transfer function, transport delay, actuator

For citation:

Khubeev M. K. Resource Efficient Proportional-Integrated Controller, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 723–728.

DOI: 10.17587/mau.18.723-728

References

1. **Matveikin V. G., Muromcev D. Ju.** *Teoreticheskie osnovy jenergosberegajushhego upravlenija dinamicheskimi rezhimami ustanovok proizvodstvenno-tehnicheskogo naznachenija* (Theoretical bases of energy saving management of the dynamic modes of installations of technological appointment), Moscow, Mashinostroenie 1, 2007, 128 p. (in Russian).
2. **Petrishhev V. F.** *Jenergosberegajushhij algoritm upravlenija pereorientaciej kosmicheskogo apparata po zashumlennym izmerenijam* (Power-Efficient Algorithm for the Spacecraft Reorientation Control by Noisy Measurements), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 7, pp. 474–483 (in Russian).
3. **Raj C. T., Srivastava S. P., Agarwal P.** Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 2009, vol. 1, no. 1, pp. 61–70.

4. **Hensel B.** et al. A simple PI controller tuning rule for sensor energy efficiency with level-crossing sampling, *Systems, Signals and Devices (SSD), International Multi-Conference*, 2012, pp. 243–248.

5. **Zhmud' V. A., Kastornyj V. A.** *Koncepcija jenergosberegajushhih reguljatorov* (Concept of energy saving regulators), *Avtomatika i Programmaja Inzhenerija*. 2013, no. 4, pp. 14–21 (in Russian).

6. **Ickovich E. L.** *Sovremennye tendencii razvitiya avtomaticheskoy chasti system upravlenija tehnologicheskimi processami* (Current trends in the development of automatic part of process control system), *Datchiki i Sistemy*, 2015, no. 11, pp. 68–76 (in Russian).

7. **Bespalov A. V., Haritonov N. I.** *Sistemy upravlenija himiko-tehnologicheskimi processami* (Control systems of chemical-technological processes), Moscow, IKC "Akademkniga", 2007, 690 p. (in Russian).

8. **Khubeev M. K.** *Jenergosberegajushhij PI-reguljator* (Energy-saving PI-regulator), *Avtomatizatsija v Promyshlennosti*, 2015, no. 3, pp. 37–39 (in Russian).

9. **Khubeev M. K.** *Jenergosberegajushhij proporcional'no-integral'nyj reguljator* (Energy-saving proportional-integral controller), *Jeneregobezopasnost' i Jenergosberezhenie*, 2014, no. 5, pp. 29–33 (in Russian).

УДК 681.518

DOI: 10.17587/mau.18.728-733

А. Н. Жирабок, д-р техн. наук, проф., zhirabok@mail.ru, **А. Е. Шумский**, д-р техн. наук, проф.,

А. В. Зуев, канд. техн. наук, доц.,

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток,
Институт прикладной математики ДВО РАН, г. Владивосток

Подход к диагностированию линейных систем на основе скользящих наблюдателей¹

Рассматривается задача функционального диагностирования технических систем, описываемых линейными динамическими моделями. Предлагается подход, позволяющий существенно повысить степень робастности процесса диагностирования линейных систем при действии неизвестных внешних возмущений и состоящий из двух этапов: на первом этапе синтезируются скользящие наблюдатели, чувствительные к действующим на систему возмущениям и нечувствительные к дефектам, которые осуществляют оценку этих возмущений; на втором этапе полученные оценки вводятся в диагностические наблюдатели, обеспечивающие обнаружение дефектов. Представлены результаты моделирования, подтверждающие эффективность полученных теоретических результатов.

Ключевые слова: линейные модели, функциональное диагностирование, скользящие наблюдатели, робастность, декомпозиция

Введение

Функциональное диагностирование (ФД) является одним из мощных средств повышения эффективности эксплуатации сложных технических систем. Оно позволяет осуществлять проверку правильности функционирования системы в процессе выполнения ею своих основных функций и оперативно поставлять информацию о возникающих сбоях и дефектах. За несколько последних десятилетий было разработано множество разнообразных методов ФД на основе диагностических наблюдателей, соотношений паритета и идентификации [1–5]. Одним из них является метод на основе скользящих наблюдателей, который за счет особенностей скользящего режима [6] активно используется на практике для идентификации дефектов и построения отказоустойчивых систем, чему посвящено большое число публикаций [7–11].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-09-00046).

В настоящей работе этот подход предлагается использовать для повышения степени робастности процесса диагностирования за счет совместного использования скользящего и диагностического наблюдателей: с помощью скользящего наблюдателя оценивается возмущение, действующее на объект диагностирования, которое затем используется в качестве исходных данных для диагностического наблюдателя. Под возмущением в данном случае понимается совокупность внешних неконтролируемых воздействий, погрешностей измерительных средств и неточностей используемых моделей.

1. Скользящие наблюдатели, основные соотношения

Рассмотрим класс технических систем, описываемых линейной моделью

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + Gu(t) + Dd(t) + Lp(t), y(t) = Hx(t). \quad (1.1)$$

Здесь $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^l$ — векторы состояния, управления и выхода; $F \in R^{n \times n}$, $G \in R^{n \times m}$, $D \in R^{n \times q}$, $L \in R^{n \times p}$ и $H \in R^{l \times n}$ — известные посто-

янные матрицы; $d(t) \in R^q$ — вектор-функция, описывающая дефекты: при их отсутствии $d(t) = 0$, при появлении дефекта $d(t)$ становится неизвестной функцией времени; $\rho \in R^p$ — вектор, описывающий действующее на систему возмущение, $\rho(t)$ предполагается неизвестной функцией времени.

Для решения поставленной задачи коротко напомним основные результаты из работы [7], используемые в настоящей работе, полагая, что $d(t) = 0$.

Предполагается, что система (1.1) удовлетворяет следующим условиям [7]: 1) $p \leq l < n$, H и L — матрицы полного ранга; 2) $\text{rank}(HL) = p$; 3) триплет (F, L, H) — минимально-фазовый, т. е. инвариантные нули матрицы Розенброка для системы (1.1) устойчивы или отсутствуют ([11], стр. 24). Известно [11], что при этих предположениях существует

невырожденное преобразование координат $\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = Mx$ такое, что в новых координатах $z_1 \in R^{n-l}$, $z_2 \in R^l$ уравнения движения системы (1.1) распадаются на две подсистемы уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1(t) &= F_{11}z_1(t) + F_{12}z_2(t) + G_1u(t); \\ \dot{z}_2(t) &= F_{21}z_1(t) + F_{22}z_2(t) + G_2u(t) + L_2\rho(t); \\ y(t) &= z_2(t), \end{aligned} \quad (1.2)$$

первая из которых не зависит от возмущения $\rho(t)$. Если матрица F_{11} в (1.2) устойчива, то можно построить наблюдатель, работающий в скользящем режиме [7]:

$$\begin{aligned} \hat{\dot{z}}_1(t) &= F_{11}\hat{z}_1(t) + F_{12}\hat{z}_2(t) + G_1u(t) - F_{12}e_y(t); \\ \hat{\dot{z}}_2(t) &= F_{21}\hat{z}_1(t) + F_{22}\hat{z}_2(t) + \\ &+ G_2u(t) - (F_{22} - F_{22}^*)e_y(t) + v(t); \\ \hat{y}(t) &= \hat{z}_2(t), \end{aligned} \quad (1.3)$$

где $\hat{y}(t)$ — выход наблюдателя; $\hat{z}(t) = \begin{pmatrix} \hat{z}_1 \\ \hat{z}_2 \end{pmatrix}$ — вектор состояния наблюдателя; $e_y(t) = \hat{y}(t) - y(t)$; F_{22}^* — некоторая устойчивая матрица; разрывная функция $v(t)$ определяется соотношением

$$v(t) = \begin{cases} -q\|L_2\| \frac{Pe_y(t)}{\|Pe_y(t)\|}, & \text{если } e_y(t) \neq 0, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $P \in R^{p \times p}$ — матрица Ляпунова для F_{22}^* , скаляр q выбирается из условия $\|p\| < q$.

Положим $e_1(t) = \hat{z}_1(t) - z_1(t)$, тогда

$$\begin{aligned} \dot{e}_1(t) &= F_{11}e_1(t); \\ \dot{e}_y(t) &= F_{21}e_1(t) + F_{22}^*e_y(t) + v(t) - L_2\rho(t). \end{aligned}$$

Известно, что скользящий режим позволяет обеспечить равенства $e_y(t) = 0$ и $\dot{e}_y(t) = 0$ за конечное время, поэтому из предыдущих уравнений следует

$$0 = F_{21}e_1(t) + v_{eq}(t) - L_2\rho(t), \quad (1.4)$$

где $v_{eq}(t)$ — сигнал, который может быть аппроксимирован переменной [7]

$$v_{\delta}(t) = -q\|L_2\| \frac{Pe_y(t)}{\|Pe_y(t)\| + \delta},$$

где δ — малое положительное число. Выражение (1.4) может быть использовано для оценки возмущения $\rho(t)$ следующим образом:

$$\rho(t) = -q\|L_2\| (L_2^T L_2)^{-1} L_2^T \frac{Pe_y(t)}{\|Pe_y(t)\| + \delta}.$$

Следует отметить, что правая часть этого выражения вычисляется в реальном времени и зависит только от ошибки $e_y(t)$.

2. Построение наблюдателя

Общее решение. Для использования изложенного выше при решении поставленной задачи строится редуцированная модель динамики системы (1.1), инвариантная к дефекту и чувствительная к возмущению, описываемая уравнением

$$\dot{x}_*(t) = F_*x_*(t) + G_*u(t) + J_*y(t) + L_*\rho(t), \quad (2.1)$$

где x_* — вектор состояния; F_* , G_* , J_* и L_* — матрицы, подлежащие определению. Предполагается [2], что при отсутствии дефектов и возмущений выполняется равенство $x_*(t) = \Phi x(t)$ для некоторой матрицы Φ , удовлетворяющей условиям

$$\Phi F = F_*\Phi + J_*H, \quad G_* = \Phi G. \quad (2.2)$$

При построении модели (2.1) матрица F_* ищется в каноническом виде:

$$F_* = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

Используя формулу (2.3), получим из соотношения (2.2) уравнения для строк матриц Φ и J :

$$\Phi_i F = \Phi_{i+1} + J_* H, \quad i = 1, \dots, k-1, \quad \Phi_k F = J_k H. \quad (2.4)$$

Как показано в работе [2], уравнения (2.4) могут быть приведены к одному уравнению $\Phi_1 F^k = J_* H F^{k-1} + J_* H F^{k-2} + \dots + J_k H$. Запишем его в виде

$$(\Phi_1 - J_* H - J_* H F \dots - J_k H F^{k-1}) V^{(k)} = 0, \quad (2.5)$$

где

$$V^{(k)} = \begin{pmatrix} F^k \\ J F^{k-1} \\ \vdots \\ H \end{pmatrix}.$$

Построение модели, инвариантной к дефекту.

Для построения модели, инвариантной к дефекту, описываемому матрицей D , необходимо выполнить

условие $\Phi D = 0$. Для его учета перепишем первое уравнение из (2.4) при $i = 2, 3$ в следующем виде:

$$\begin{aligned}\Phi_2 &= \Phi_1 F - J_{*1} H, \\ \Phi_3 &= \Phi_2 F - J_{*2} H = (\Phi_1 F - J_{*1} H) F - J_{*2} H = \\ &= \Phi_1 F^2 - J_{*1} H F - J_{*2} H.\end{aligned}\quad (2.6)$$

Остальные уравнения получаются по аналогии. По аналогии с работой [12] можно показать, что условие $\Phi D = 0$ может быть представлено в виде

$$(\Phi_1 - J_{*1} - J_{*2} \dots - J_{*k}) B^{(k)} = 0, \quad (2.7)$$

где

$$B^{(k)} = \begin{pmatrix} D & FD & F^2 D & F^{k-1} D \\ 0 & HD & HFD & HF^{k-2} D \\ 0 & 0 & HD & HF^{k-3} D \\ \dots & \dots & \dots & \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2.8)$$

Поскольку строка $(\Phi_1 - J_{*1} - J_{*2} \dots - J_{*k})$ удовлетворяет условию (2.5), из соотношений (2.5) и (2.7) следует уравнение

$$(\Phi_1 - J_{*1} - J_{*2} \dots - J_{*k})(V^{(k)} B^{(k)}) = 0. \quad (2.9)$$

Оно имеет нетривиальное решение, если

$$\text{rank}(V^{(k)} B^{(k)}) < lk + \text{rank}(D \quad FD \dots F^{k-1} D). \quad (2.10)$$

Для построения модели, инвариантной к дефекту, из неравенства (2.10) определяется минимальная размерность k и из уравнения (2.9) — строка $(\Phi_1 - J_{*1} - J_{*2} \dots - J_{*k})$, затем на основе (2.6) строится матрица Φ и принимается $G_* = \Phi G$ и $L_* = \Phi L$.

3. Решение проблемы

Построение скользящего наблюдателя. Для оценки возмущения $\rho(t)$ будем рассматривать построенную модель (2.1) как систему, для которой строится скользящий наблюдатель. Положим $y_*(t) = x_*(t)$ и примем в системе (1.2) $z_1 := 0$, $z_2 := x_*$, $F_{21} := 0$,

$F_{22} := F_*$, $u(t) := \begin{pmatrix} u(t) \\ y(t) \end{pmatrix}$, $G_2 := (G_* \ J_*)$, $L_2 := L_*$. Так как тогда H_* — тождественная матрица, то предположения 1—3 с очевидностью выполняются. В этом случае наблюдатель (1.3) принимает вид

$$\begin{aligned}\hat{\dot{x}}_*(t) &= F_* \hat{x}_*(t) + G_* u(t) + J_* y(t) - \\ &- (F_* - F_*) e_y(t) + v(t); \\ \hat{y}_*(t) &= \hat{x}_*(t),\end{aligned}$$

где $e_y(t) = \hat{y}_*(t) - y_*(t)$. В результате возмущение $\rho(t)$ может быть оценено следующим образом:

$$\rho(t) = -q \|L_*\| (L_*^T L_*)^{-1} L_*^T \frac{P e_y(t)}{\|P e_y(t)\| + \delta}, \quad (3.1)$$

где $P \in R^{p \times p}$ — матрица Ляпунова для F_* , которая, в свою очередь, должна быть устойчивой.

Построение диагностического наблюдателя. Для решения задачи диагностирования строится диагностический наблюдатель, чувствительный к дефекту. Если при этом он оказывается нечувствительным к возмущению, то проблема решается без обращения к скользящему наблюдателю. Такое, однако, бывает достаточно редко, и в этих случаях предлагается использовать скользящий наблюдатель для оценки значения этого возмущения в виде (3.1) и использования этой оценки при реализации процесса диагностирования.

Описание диагностического наблюдателя имеет вид, аналогичный (2.1):

$$\begin{aligned}\dot{x}_0(t) &= F_0 x_0(t) + G_0 u(t) + J_0 y(t) + L_0 \rho(t), \\ y_0(t) &= H_0 x_0(t),\end{aligned}\quad (3.2)$$

матрицы, входящие в (3.2), подчиняются уравнениям

$$RH = H_0 \Phi', \quad \Phi' F = F_0 \Phi' + J_0 H, \quad G_0 = \Phi' G, \quad L_0 = \Phi' L \quad (3.3)$$

для некоторой матрицы Φ' . Невязка, используемая для принятия решений о том, возник дефект или нет, ищется в виде $r(t) = Ry(t) - y_0(t)$. Обратная связь в наблюдателе для простоты не рассматривается. Слагаемое $L_0 \rho(t)$ показано в (3.2) в целях демонстрации уровня возмущений, действующих на наблюдатель, и для введения оцененного скользящим наблюдателем возмущения.

Как и в разделе 2, матрица F_0 ищется в каноническом виде (2.3), матрица H_0 принимается в виде $H_0 = (1 \ 0 \dots 0)$. В этом случае можно показать [2], что матрицы R и J_0 удовлетворяют уравнению

$$RHF^k = J_{01} HF^{k-1} + J_{02} HF^{k-2} + \dots + J_{0k} H. \quad (3.4)$$

Для получения чувствительности к дефекту должно выполняться условие $\Phi' L \neq 0$. Обеспечить выполнение этого условия можно, например, таким способом. Пусть матрица D^T линейно выражается через строки матрицы H , т. е. $D^T = RH$ для некоторой матрицы R . Так как из вида матрицы H_0 и соотношений (3.3) следует $\Phi'_1 = RH$, то $\Phi'_1 D = RHD = D^T D \neq 0$ для ненулевой матрицы D .

В ряде случаев проблема обеспечения чувствительности к дефекту решается выбором $R = (1 \ 1 \dots 1)$.

Зная матрицу R , из (3.4) можно найти минимальную размерность k и матрицу J_0 , затем на основе (3.3) найти остальные матрицы, описывающие наблюдатель. Поскольку оценка (3.1) является приближенной, полную развязку от возмущения получить не удастся, но степень робастности решения задачи диагностирования существенно повышается.

4. Пример

Рассмотрим линеаризованную модель электропривода [13]:

$$\dot{x}_1 = k_1 x_2;$$

$$\dot{x}_2 = k_2 x_3 + \rho;$$

$$\dot{x}_3 = k_3 x_2 + k_4 x_3 + k_5 u,$$

где $x_1 = \alpha_n$, $x_2 = \dot{\alpha}$, $x_3 = I$, $k_1 = 1/i_p$, $k_2 = k_M/J$, $k_3 = -k_\omega/L$, $k_4 = -R/L$, $k_5 = k_y/L$; I — ток якоря; R — активное сопротивление цепи якоря; L — индуктивность цепи якоря; k_ω — коэффициент противоЭДС; k_y — коэффициент усиления усилителя мощности; k_M — коэффициент крутящего момента; J — момент инерции вала электродвигателя и вращающихся частей редуктора; α_n — угол поворота выходного вала редуктора; $\dot{\alpha}$ — скорость вращения ротора электродвигателя; i_p — передаточное отношение редуктора; u — напряжение на входе усилителя мощности.

Полагая, что измеряемыми являются переменные x_1 и x_3 , а дефект моделируется изменением коэффициента k_4 , что соответствует изменению активного сопротивления цепи якоря электродвигателя (например, при его значительном нагреве), рассматриваемую модель опишем следующими матрицами:

$$F = \begin{pmatrix} 0 & k_1 & 0 \\ 0 & 0 & k_2 \\ 0 & k_3 & k_4 \end{pmatrix}, G = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ k_5 \end{pmatrix}, H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, L = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

При наличии возмущения $\rho(t)$, представленного матрицей L , наблюдатель, обнаруживающий описанный дефект и нечувствительный к возмущению, традиционными методами построить не удастся, поэтому необходимо использовать предложенный в работе метод. Для этого вначале построим модель, инвариантную к дефекту. Можно проверить, что условие (2.10) выполняется при $k = 2$. Непосредственные вычисления дают:

$$V^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & k_1 k_2 \\ 0 & k_2 k_3 & k_2 k_4 \\ 0 & k_3 k_4 & k_4^2 + k_2 k_3 \\ 1 & k_1 & 0 \\ 0 & k_3 & k_4 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, FD = \begin{pmatrix} 0 \\ k_2 \\ k_4 \end{pmatrix}, B^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & k_2 \\ 1 & k_4 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Можно проверить, что уравнение (2.9) имеет решение при

$$\Phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 \end{pmatrix}, J = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & k_1 k_2 \end{pmatrix}.$$

Тогда $G^* = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$, $L^* = \begin{pmatrix} 0 \\ k_1 \end{pmatrix}$, и редуцированная

модель с $F^* = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ описывается уравнениями

$$\dot{x}_{*1} = x_{*2};$$

$$\dot{x}_{*2} = k_1 k_2 y_2 + k_1 \rho;$$

$$y_* = x_*,$$

где $x_{*1} = x_1$, $x_{*2} = k_1 x_2$.

Для построения скользящего наблюдателя примем $F^* = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$, тогда $P = \begin{pmatrix} 0,5 & 0 \\ 0 & 0,5 \end{pmatrix}$ и

$F^* - F^* = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$. Его описание имеет следующий вид:

$$\hat{\dot{x}}_{*1} = \hat{\dot{x}}_{*2} - e_{1y} + v_1;$$

$$\hat{\dot{x}}_{*2} = k_1 k_2 y_2 - e_{2y} + v_2;$$

$$\hat{y}_* = \hat{x}_*,$$

где $e_{1y} = \hat{y}_{*1} - y_{*1} = \hat{y}_{*1} - x_{*1}$, $e_{2y} = \hat{y}_{*2} - y_{*2} = \hat{y}_{*2} - x_{*2}$,

$$v = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = -q k_1 \frac{P e_y}{\|P e_y\|} =$$

$$= -q k_1 \frac{1}{\sqrt{(0,5 e_{y1})^2 + (0,5 e_{y2})^2}} \begin{pmatrix} 0,5 e_{y1} \\ 0,5 e_{y2} \end{pmatrix}.$$

При построении диагностического наблюдателя примем $R = (0 \ 1)$. Уравнение (3.4) при минимальном $k = 2$ имеет решение в виде

$$J_0 = \begin{pmatrix} k_3 k_4 / k_1 & 0 \\ 0 & k_4^2 + k_2 k_3 \end{pmatrix},$$

откуда $\Phi' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -k_3 k_4 / k_1 & k_3 & k_4 \end{pmatrix}$, $L_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ k_3 \end{pmatrix}$, $G_0 = \begin{pmatrix} k_5 \\ k_4 k_5 \end{pmatrix}$.

Диагностический наблюдатель описывается следующими уравнениями:

$$\dot{x}_{01} = x_{02} + k_3 k_4 y_1 / k_1 + k_5 u;$$

$$\dot{x}_{02} = (k_4^2 + k_2 k_3) y_2 + k_4 k_5 u + k_3 \rho;$$

$$y_0 = x_{01}, \quad (4.1)$$

где $\rho = -q \frac{0,5 e_{y2}}{\sqrt{(0,5 e_{y1})^2 + (0,5 e_{y2})^2} + \delta}$, невязка формируется в виде $r = y_2 - y_0$.

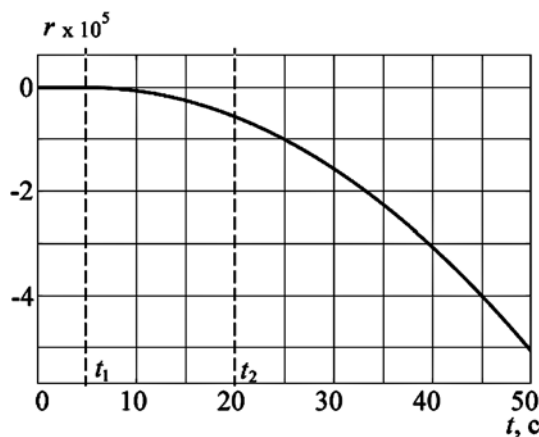


Рис. 1. Невязка при действии постоянного возмущения без его учета в наблюдателе

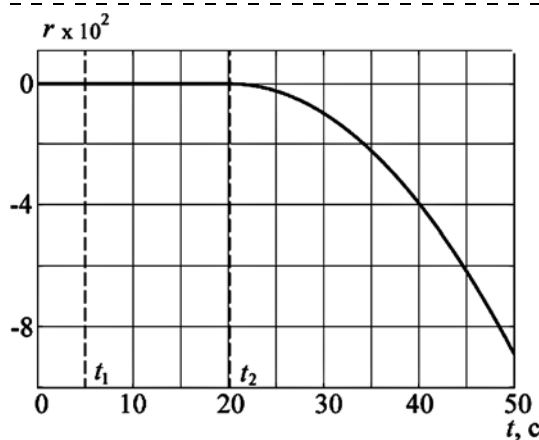


Рис. 2. Невязка при действии постоянного возмущения с его учетом в наблюдателе (4.1)

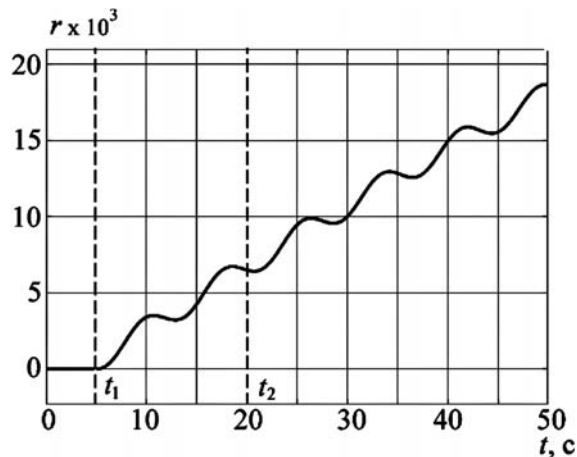


Рис. 3. Невязка при действии переменного возмущения без его учета в наблюдателе

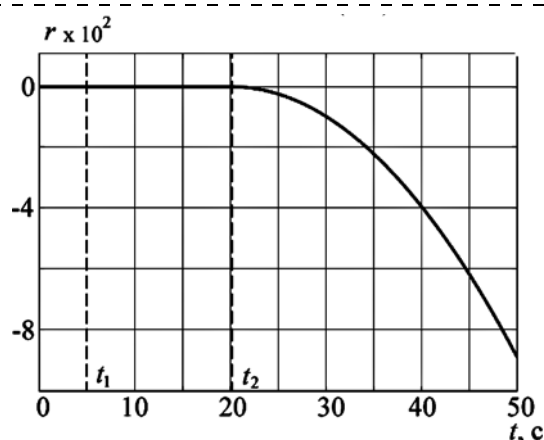


Рис. 4. Невязка при действии переменного возмущения с его учетом в наблюдателе (4.1)

При моделировании задавались следующие параметры электропривода: $J = 0,0001 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$, $k_{\omega} = 0,02 \text{ В} \cdot \text{с}$, $k_v = 100$, $R = 0,4 \text{ Ом}$, $L = 0,004 \text{ Гн}$, $k_M = 0,02 \text{ Н} \cdot \text{м/А}$, $i = 100$. На электропривод подавалось управление $u(t) = 2\sin t$, дефект имитировался скачкообразным изменением значения активного сопротивления на 50 % в момент времени $t_2 = 20 \text{ с}$. Возмущение моделировалось двумя способами: скачкообразным изменением значения ρ от нуля до 100 в момент времени $t_1 = 5 \text{ с}$ и в виде переменной $\rho(t) = 100\sin t$ при $t \geq 5$. Моделировалась работа робастного (с учетом полученной оценки возмущения) и обычного (без ее учета) наблюдателей. Поведение полученных невязок r показано на рис. 1—4.

Из представленных рисунков видно, что до момента t_1 , когда на систему начинает действовать возмущение ρ , невязки, формируемые обычным и робастным наблюдателями, равны 0. При появлении как постоянного, так и переменного возмущения в обычном наблюдателе невязка начинает изменяться, что приводит к ложным срабатываниям системы диагностирования и не позволит правиль-

но определить момент появления дефекта. Невязка, которую формирует робастный наблюдатель, остается нулевой до момента появления дефекта.

Таким образом, результаты моделирования показали работоспособность и высокую эффективность предложенного в работе метода повышения робастности процедуры диагностирования.

Заключение

В работе предложен новый метод обеспечения робастности при диагностировании технических систем, описываемых линейными моделями. Метод основан на построении редуцированной модели исходной системы, синтезе для нее скользящего наблюдателя, оценивающего действующее на систему возмущения, и дальнейшем использовании этой оценки для работы диагностического наблюдателя.

Список литературы

1. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем. М.-СПб.: МГУ-ГРИФ, 1998.

2. Шумский А. Е., Жирабок А. Н. Методы и алгоритмы диагностики и отказоустойчивого управления динамическими системами. Владивосток: Изд. ДВГТУ, 2009.
3. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
4. Ding S. *Data-driven Design of Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control Systems*. London: Springer-Verlag, 2014.
5. Simani S., Fantuzzi C., Patton R. *Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.
6. Уткин В. И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. М.: Наука, 1974.
7. Edwards C., Spurgeon S., Patton R. Sliding mode observers for fault detection and isolation // *Automatica*. 2000. Vol. 36. P. 541–553.
8. Floquet T., Barbot J., Perruquetti W., Djemai M. On the robust fault detection via a sliding mode disturbance observer // *Int. J. Control*. 2004. Vol. 77. P. 622–629.

9. Halim Alwi H., Edwards C. Fault tolerant control using sliding modes with on-line control allocation // *Automatica*. 2008. Vol. 44. P. 1859–1866.
10. He J., Zhang C. Fault Reconstruction Based on Sliding Mode Observer for Nonlinear Systems // *Mathematical Problems in Engineering*. 2012. P. 1–22.
11. Нелинейная динамика и управление: сборник статей. Вып. 6 / Под ред. С. В. Емельянова, С. К. Коровина. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 340 с.
12. Жирабок А. Н., Соляник С. П., Павлов С. В. Подход к диагностированию линейных систем непараметрическим методом // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2016. № 8. С. 507–515.
13. Филаретов В. Ф. Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов. Владивосток: ДВГТУ, 2000. 304 с.

Approach to Fault Diagnosis in Linear Systems by Non-Parametric Method

A. N. Zhirabok, zhirabok@mail.ru✉, A. E. Shumsky, A. V. Zuev,
Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, Russian Federation

Corresponding author: Zhirabok Aleksey N., Professor
of Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, Russian Federation
e-mail: zhirabok@mail.ru

Accepted on August 04, 2017

The problem of fault diagnosis in technical systems described by linear dynamic models is studied. The suggested method of diagnosis is based on sliding mode observers estimating the disturbances that then is used for diagnostic observer operation. As a result, a degree of robustness of the diagnostic process is increased significantly. To realize the suggested method, three steps have to be fulfilled. Firstly, the reduced model of the system under consideration invariant with respect to the faults and sensitive to the disturbances is constructed. Based on this model, the sliding mode observer estimating the disturbances is obtained. The feature of such an observer is that a sliding motion takes place forcing the estimation error equal to zero in finite time therefore the disturbances can be estimated. Finally, the diagnostic observer sensitive to the faults and the disturbances and using the estimated disturbances as the known input is designed. This observer generates a residual which is used for decision making about faults. Since the disturbances are used now as the known input, a degree of robustness is increased significantly. Theoretical results are illustrated by practical example of the general electric servomotor of manipulation robots under absence of the external loading moment.

Keywords: linear models, fault diagnosis, reducing model, sliding mode observer, diagnostic observer, robustness, decomposition

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 16-09-00046).

For citation:

Zhirabok A. N., Shumsky A. E., Zuev A. V. Approach to Fault Diagnosis in Linear Systems by Non-Parametric Method, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 728–733.

DOI: 10.17587/mau.18.728-733

References

1. Mironivskii L. A. *Functionalnoe diagnostirovanie dinamicheskikh sistem* (Functional diagnosis in dynamic systems), Moscow, Publishing house of MSU, 1998 (in Russian).
2. Shumsky A., Zhirabok A. *Metody i algoritmy diagnostirovaniya i otkazoustoichivogo upravleniya dinamicheskimi sistemami* (Methods and algorithms for fault diagnosis and fault tolerant control in dynamic systems), Vladivostok, Publishing house of FESTU, 2009 (in Russian).
3. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*, Berlin, Springer-Verlag, 2006.
4. Ding S. *Data-driven Design of Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control Systems*, London, Springer-Verlag, 2014.
5. Simani S., Fantuzzi C., Patton R. *Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification*, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2002.

6. Utkin V. I. *Skolzyaschie rezhimy i ih isoilzovanie v sistemah s peremennoi strukturoi* (Sliding modes and their applications in systems with variable structure), Moscow, Nauka, 1974 (in Russian).
7. Edwards C., Spurgeon S., Patton R. Sliding mode observers for fault detection and isolation, *Automatica*, 2000, vol. 36, pp. 541–553.
8. Floquet T., Barbot J., Perruquetti W., Djemai M. On the robust fault detection via a sliding mode disturbance observer, *Int. J. Control*, 2004, vol. 77, pp. 622–629.
9. Halim Alwi H., Edwards C. Fault tolerant control using sliding modes with on-line control allocation, *Automatica*, 2008, vol. 44, pp. 1859–1866.
10. He J., Zhang C. Fault Reconstruction Based on Sliding Mode Observer for Nonlinear Systems, *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, pp. 1–22.
11. Emelyanov S. V., Korovin S. K. eds. *Nelineynaya dinamika i upravlenie* (Nonlinear dynamics and control), vol. 6, Moscow, Fizmatlit, 2008, 340 p. (in Russian).
12. Zhirabok A. N., Solyanik S. P., Pavlov S. V. *Podkhod k diagnostirovaniyu lineinykh sistem neparametricheskim metodom* (The approach to diagnosis in linear systems by nonparametric method), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, pp. 507–515 (in Russian).
13. Filaretov V. F. *Samonastrayayushchiesya sistemy upravleniya privodami manipulyatorov* (Self-tuning control systems of servo actuators of manipulators), Vladivostok, Publishing house of FESTU, 2000, 304 p. (in Russian).

А. И. Мотиенко, науч. сотр., канд. техн. наук, anna.gunchenko@gmail.com,

А. Л. Ронжин, зам. директора, д-р техн. наук, проф., ronzhin@iiias.spb.su,
ФГБУН Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации
Российской академии наук (СПИИРАН), Санкт-Петербург,

А. А. Алтунин, зам. начальника управления, a.altunin@gctc.ru,

Б. И. Крючков, гл. науч. сотр., д-р техн. наук, b.kryuchkov@gctc.ru,

В. М. Усов, гл. науч. сотр., д-р мед. наук, проф., v.usov@gctc.ru,

ФГБУ "Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина"
(НИИ ЦПК имени Ю. А. Гагарина), Звездный городок, Московская область

Эвакуация космонавта в скафандре во время внекорабельной деятельности на поверхности Луны с участием аварийно-спасательных роботов

Рассматривается использование автономных мобильных роботов (АМР) в будущих пилотируемых полетах для оказания необходимой помощи экипажу, когда возникает нарушение состояния работоспособности космонавта в скафандре на поверхности Луны. В работе делается попытка распространить опыт применения аварийно-спасательных роботов в экстремальных условиях на Земле на ситуацию применения робота-спасателя при внекорабельной деятельности (ВКД) на лунной поверхности.

Ключевые слова: автономные мобильные роботы, внекорабельная деятельность (ВКД) на Луне, космический скафандр, нарушение работоспособности космонавта, робот-спасатель

Введение

Проблемы спасения людей в условиях чрезвычайных ситуаций (ЧС) и на поле боя стимулировали интерес к применению беспилотных роботов-спасателей и роботизированных транспортных платформ (с системой жизнеобеспечения и транспортировки) на этапах поиска, спасения и эвакуации, а также дистанционно управляемых роботизированных систем (РТС) для своевременной диагностики и выполнения необходимых манипуляций в объеме первой помощи. Сегодня в технологически развитых странах мира существует ряд успешных научно-технических проектов в рамках перспективных программ создания РТС в различных областях медицины, однако необходимы дополнительные усилия для практического внедрения РТС в условиях экстремальной среды для спасения лиц опасных профессий, которые подвергаются наибольшему риску при выполнении своей профессиональной деятельности. Непредвиденные и нештатные ситуации, которые приводят к предпосылкам или к возникновению самих ЧС в таких областях, как авиация, космонавтика, морские подводные испытания и др., вызывают большой негативный

общественный резонанс, а потери высококлассных специалистов, профессиональная подготовка которых длится годами, а опыт — бесценен, часто не могут быть компенсированы в сжатые сроки. Из этого следует необходимость разработки новых подходов к организации и техническому обеспечению работ по спасению и эвакуации лиц опасных профессий в экстремальной среде.

Для перспективных программ освоения Луны актуален вопрос использования при внекорабельной деятельности (ВКД) мобильного робота, который способен в пределах определенного диапазона условий к выполнению в автономном режиме навигации в сложной обстановке. Предполагается, что помимо работы в автономном режиме автономный мобильный робот (АМР) может взаимодействовать с космонавтом на поверхности Луны в режиме "Следуй за Мной" (Ведущий/Ведомый), чтобы обеспечить выполнение некоторых ассистивных функций. В их число могут входить переноска груза и инструментов, а также поддержка коммуникаций между участниками ВКД. Сложность дистанционного взаимодействия участников ВКД с АМР и построения обратной связи для космонавта-диспетчера в лунном аппарате о ходе ВКД, состоянии

работоспособности космонавта "на выходе" и о состоянии окружающей среды требуют разработки средств информационного обеспечения с применением ряда современных информационных технологий [1–2]. Самые большие трудности возникают в случае отказа системы жизнеобеспечения скафандра и/или потери работоспособности космонавта в скафандре. Они связаны с проблемой спасения и эвакуации космонавта в скафандре с поверхности в лунный аппарат. Эти вопросы высокоактуальны, но недостаточно освещены в современной литературе и требуют исследования с учетом имеющихся наземных прототипов и опыта обеспечения безопасности ВКД при ее моделировании на наземных стендах и в реальных пилотируемых полетах на МКС.

Современное состояние и перспективы применения роботов-спасателей для спасения и эвакуации лиц опасных профессий

▲ Опыт построения и применения аварийно-спасательных роботов в наземных условиях

Сегодня имеется определенный опыт создания роботов для выполнения аварийно-спасательных работ, и объем публикаций на эту тему продолжает расти [3–7]. Анализ показывает, что базовые подходы и решения в области наземного применения роботов-спасателей "в натуральных условиях" по ряду причин не однородны. Во многом эти решения диктуются условиями применения: характером рельефа, составом почвы, возможностями использования различных средств позиционирования и навигации, связи, протяженностью маршрутов между этапами эвакуации и др. На наш взгляд, при выборе путей создания и применения роботов для спасения лиц опасных профессий надо начинать с конкретизации тех рисков и угроз, которые непосредственно вытекают из характера решаемых задач. В работе [3] систематизированы виды спасательных работ в зонах ЧС, для которых необходимо изыскивать дополнительные ресурсы, в том числе посредством использования АМР при проведении эвакуационных мероприятий.

Сегодня в области создания аварийно-спасательных роботов усилия в основном концентрируются в направлениях создания дистанционно управляемых роботов:

1) ориентированных на работу в первой стадии ликвидации последствий ЧС, а именно на общую разведку/оценку обстановки на месте ЧС, расчистку завалов, прокладку проходов и трасс для других роботов и людей-спасателей (проект ICARUS) [7];

2) действующих на второй стадии ликвидации последствий ЧС, когда требуется осуществить поиск, спасение и транспортировку пострадавших лиц [8, 9].

На этой стадии необходимы следующие классы специализированных роботов:

- роботы, ориентированные на проникновение в труднодоступные помещения через лазы и проходы;

- роботы, способные открывать двери, закрытые на замки, и передвигаться по пожарным лестницам для проведения срочных аварийных работ [4];
- специализированные роботы для оказания первой помощи и транспортировки пораженных в безопасное место.

Можно с уверенностью говорить о том, что фактор проектирования взаимодействия людей и роботов при проведении операций спасения и эвакуации в дальнейшем будет играть все более значимую роль. По этому признаку можно выделить роботов, ориентированных в перспективе на полностью автономные действия без прямого участия человека-оператора (ЧО) в месте дислокации робота [5]. Робот при этом должен иметь высокоразвитые функции сенсорики для адаптации к сложной рабочей среде (проект ATLAS).

При выборе способа, средств и положений, в которых будут транспортироваться пораженные, ведущую роль играют виды травм, их локализация, состояние человека, характер поражения. Важным элементом транспортировки является выбор оптимальной позы пораженного. В работе [8] систематизированы данные о модели определения позы пораженного при транспортировке с учетом характера полученных травм и его общего состояния.

Если обратиться к выбору конструкции и функциональности робота, перспективного для планетарного применения, то по результатам проведенного в работах [4–7, 9–14] анализа, а также на основе многочисленных электронных публикаций можно выделить несколько удачных и апробированных на практике конструкций.

Следует особо подчеркнуть, что большое внимание уделяется дистанционно управляемым роботам с участием группы специалистов-операторов, принимающих решения, а также роботам, способным воспроизводить тонко координированные действия, связанные с химическим, биологическим и радиационным анализом образцов на месте катастрофы (проект HUBO) [14].

Среди наиболее часто цитируемых разработок, в первую очередь, заслуживает упоминания ассистивная робототехническая система для эвакуации (в русскоязычной литературе: робот-санитар) BEAR (англ.: Battlefield Extraction-Assist Robot) [11, 12]. В планы разработчиков входит улучшение способности BEAR обрабатывать высокоуровневые команды, улучшение его навигационной системы и его способности адаптации к окружающей среде [11]. Возможно, полезным дополнением к этому роботу мог бы стать змеевидный диагностический робот-манипулятор, который исследователи из американского университета Карнеги-Меллон разработали для помощи медицинскому персоналу в ходе визуального дистанционного обследования раненого непосредственно на поле боя [13]. Управление таким "кинематически избыточным манипулятором" осуществляется дистанционно, с помощью джойстика. Устройство включает в себя множество

шарниров и может изгибаться в разных направлениях для выполнения различных медицинских операций. Известны технические решения по включению такого манипулятора в состав роботизированных носилок (платформы), что позволяет надеяться на более широкое применение роботизированных систем при решении вопросов медицинской эвакуации.

К упомянутому выше роботу BEAR близок по конструкции и назначению Robosue — робот, разработанный фирмой Kikuchi Manufacturing (Япония). Кроме выше приведенных вариантов мобильных роботов на гусеничном ходу необходимо отметить большой интерес к созданию антропоморфных моделей, построенных на различных принципах передвижения, включая двуногую ходьбу (зарубежные роботы SHIMR, HUBO, Atlas [14, 15]). В целом, можно полагать, что среди множества современных робототехнических средств, разрабатываемых применительно к экстремальным условиям, особое место занимают мобильные роботы. Широкий спектр их функциональных возможностей, постоянная готовность к применению делают их привлекательными для служб экстренного реагирования.

Резюмируя сказанное, можно констатировать, что сегодня существуют наземные прототипы РТС для разработки робота-спасателя применительно к эвакуации на поверхности Луны космонавтов в скафандре в лунный аппарат в случае нештатной ВКД. Одновременно надо принимать во внимание существующие отличия земных условий и условий на поверхности Луны, так как для человека эта необычная среда обитания несет новые риски для жизни и здоровья. Кроме того, высокая сложность ВКД требует особых мер безопасности и специальной организации коммуникации участников ВКД. Частично эти вопросы будут освещены в следующем разделе.

▲ *Опыт подготовки космонавтов к проведению спасательных работ в ходе ВКД с эвакуацией пострадавшего космонавта в скафандре*

ВКД относится к одному из самых ответственных видов полетных операций. Она требует слаженной работы экипажа, строгого выполнения требований безопасности работ, навыков выполнения спасательных работ и экстренной эвакуации. При разработке новых предложений к вариантам реализации ВКД, в частности на лунной поверхности, необходимо учитывать многолетний опыт подготовки космонавтов к работе в скафандре, к выживанию в разных климатогеографических зонах, к выполнению неотложных медицинских мероприятий на борту космического аппарата и, наконец, опыт ВКД на орбитальных станциях. В частности, при планировании ВКД на МКС большое внимание уделяется соблюдению требований по временным ограничениям, связанным с необходимостью обеспечения возвращения неработоспособного оператора (НРО) в шлюзовую отсек. Если ориентироваться на технические характеристики современных космических скафандров, то для кос-

монавта предусмотрен определенный резерв времени (до получаса), в течение которого он будет иметь достаточный объем газовой смеси для дыхания. Однако это не снимает остроту проблемы, особенно в аспектах возможного нарушения герметичности скафандра, даже при незначительной утечке газа, и потери сознания по ряду других возможных причин.

Операция по транспортировке НРО является обязательной для отработки всеми космонавтами при прохождении курса профессиональной подготовки. Подготовка по данной операции проводится в гидролаборатории и на специализированном тренажере "Выход-2". Она направлена на формирование у человека-оператора (ЧО) устойчивых навыков по безопасному перемещению НРО по внешней поверхности станции в шлюзовой отсек российского сегмента МКС, с постоянным контролем за рабочими параметрами скафандров. Для этого случая вводится понятие "нештатная ситуация" (далее — НшС), которая может возникнуть при неисправности систем скафандра, не позволяющей далее выполнять задачи ВКД, и при ухудшении самочувствия ЧО из экипажа "Выхода". Необходимо отметить, что операция по транспортировке НРО относится к числу наиболее трудных, требует больших затрат времени, которые в условиях на лунной поверхности могут существенно возрастать. Это означает, что применение робота-спасателя может быть единственным приемлемым выходом в сложившейся ситуации.

В заключение можно отметить, что не все выявленные на сегодня в ходе ВКД на МКС особенности могут быть перенесены в вариант ВКД на поверхности Луны и на аналогичные НшС.

Ограниченность движений рук в скафандре, ограниченная зона обзора из шлема современного скафандра вносят дополнительные трудности и при работе на МКС, но скафандр спроектирован таким образом, что космонавт хорошо видит рабочую зону в пределах досягаемости рук, а обзор наблюдаемого через остекление шлема пространства позволяет вести пространственную ориентировку. Есть основания говорить о том, что ограничения подвижности и обзора в скафандре могут стать более серьезным помеховым фактором для ВКД на лунной поверхности, особенно в плане ведения пространственной ориентировки и навигации.

▲ *Перспективы применения аварийно-спасательных роботов на Луне: возможности и принципы их применения на лунной поверхности в ходе ВКД*

При проведении "выходов" на поверхность Луны операции по транспортировке НРО не теряют своей актуальности и будут связаны с необходимостью перемещения НРО по поверхности планеты к шлюзовому отсеку. В данном случае потребуются помощь АМР и применение роботизированных устройств с запасами для системы обеспечения жизнедеятельности. Такие устройства могут быть как специального назначения, так и универсальные, спроектированные для транспортировки НРО.

Универсальные устройства предпочтительнее, так как их использование позволит решать основные задачи по исследованию планеты, а задачи по транспортировке НРО в данном случае будут дополнительными.

Эргономические исследования по использованию универсального напланетного ровера для транспортировки НРО были проведены NASA в процессе выполнения программы NEEMO [10].

При разработке требований к способам эвакуации космонавта в скафандре с лунной поверхности полезно обратиться к практике обеспечения безопасности при приземлении спускаемого аппарата (СА). Эвакуация космонавтов после приземления СА представляет собой сложную операцию, к выполнению которой привлекаются значительные силы и средства специализированных подразделений. Этот этап является ответственным и в медицинских аспектах. Комплекс послеполетных изменений в организме человека может отрицательно сказаться на работоспособности и психофизиологических возможностях космонавтов при необходимости самостоятельно (автономно) выживать после приземления. Наиболее остро эта проблема может проявиться в случаях нештатных и аварийных посадок (приводнений) СА вне расчетных районов, приземления в труднодоступных местах, вдали от населенных пунктов. Тем более важно так построить эвакуацию и в таком объеме предусмотреть оснащение робота-спасателя, чтобы обеспечить сохранность витальных функций организма до момента завершения транспортировки.

Необходимо отбирать потенциально пригодные решения для адаптации существующих наземных РТС к условиям освоения человеком Луны по следующим отличительным признакам:

1) массогабаритные характеристики, грузоподъемность, устойчивость к опрокидыванию при переноске грузов, сопоставимых по массе с массой робота;

2) возможности передвижения по пересеченной местности и различным по плотности почвам, возможности маневра, возможности преодоления естественных и искусственных препятствий;

3) возможности захвата и удержания предметов различной формы, жесткости. Способ захвата тела человека и погрузки на платформу робота или перенос "на руках" робота;

4) возможности позиционирования и навигации в условиях освоения Луны, использования электронных карт и дистанционно задаваемых команд на виды маневров от человека-оператора;

5) возможности трекинга подвижных объектов, определения расстояний, распознавания ориентиров и характерных объектов с помощью компьютерного зрения робота;

6) возможности организации человеко-машинного взаимодействия, применения многомодальных интерфейсов для дистанционного управления роботом, возможности бесконтактных видов управления с применением технологий виртуальной

реальности, возможности построения расширенной и улучшенной визуальной обратной связи;

7) возможность выполнения тонких манипуляций в копирующем режиме и копирующего режима следования за человеком при перемещении "в паре".

Заключение

В данной статье представлены контуры возможного построения взаимодействия людей и роботов в составе команды, которые могут улучшить проведение мероприятий по организации спасения и эвакуации космонавта, работающего в скафандре на лунной поверхности.

По результатам анализа существующих наземных прототипов и опыта выполнения ВКД в пилотируемых полетах на орбитальных станциях можно сделать определенные выводы.

Первый вывод заключается в том, что необходимо выбрать такие формы взаимодействия в смешанной команде космонавтов и роботов, которые позволяют избежать коллизий и принятия разнонаправленных управленческих решений по причине нарушения коммуникации. Эти вопросы носят общий характер применительно к разработке большого класса АМР применительно к перспективным проектам выполнения лунных миссий.

Второй вывод вытекает из наличия технологий экстремальной робототехники для поддержки мероприятий при проведении аварийно-спасательных работ на Земле и состоит в том, что сегодня накоплен весомый опыт успешного построения транспортных эвакуационных средств для применения в полевых условиях, который позволяет их адаптировать для работы в области пилотируемой космонавтики при освоении Луны.

Третий вывод базируется на обширном опыте профессиональной подготовки космонавтов к выполнению силами экипажа на орбите операций по спасению и доставке в шлюзовую камеру космического аппарата неработоспособного космонавта при условии его пребывания в скафандре и необходимости выполнения эвакуационных мероприятий в пределах лимита времени, определяемого запасами дыхательной смеси в системе обеспечения жизнедеятельности. Отработанные приемы при тренировках космонавтов на выживание в экстремальной среде (моделируемые на Земле) и меры обеспечения безопасности должны быть учтены при разработке алгоритмов выполнения операций спасения дистанционно управляемым роботом. Опыт информационного обеспечения таких тренировок должен быть творчески переработан при построении системы информационного обеспечения космонавта — диспетчера, руководящего ходом ВКД из лунного аппарата, с учетом существенного ограничения поддержки с Земли.

Четвертый вывод вытекает из особенностей пребывания космонавтов в экстремальной среде на лунной поверхности, когда нарушение функционирования систем скафандра и/или его поврежде-

ние создает исключительно неблагоприятные условия для выживания человека. Это означает необходимость поиска решений, позволяющих оснастить робот-спасатель средствами дублирования систем жизнеобеспечения для замещения этих средств в составе скафандра, а также средствами обработки телеметрической информации на случай сбоя коммуникации между космонавтом "на выходе" и космонавтом-диспетчером в лунном аппарате. Эти решения могут помочь ускорить принятие решений космонавтом-диспетчером относительно приведения в готовность медико-технических средств оказания неотложной медицинской помощи на борту лунного аппарата после доставки к лунному аппарату неработоспособного космонавта.

Пятый вывод базируется на опыте современной телемедицины, который свидетельствует о широких возможностях информационной поддержки принятия медицинских решений о проведении неотложных медицинских мероприятий на борту космического аппарата в условиях сниженной поддержки с Земли при условии построения соответствующих ассистивных технологий и обучения персонала действиям в особых случаях полета.

Список литературы

1. **Крючков Б. И., Усов В. М., Карпов А. А.** Онтологический подход к построению интерактивной виртуальной среды для визуального представления планируемых действий при диалоговом управлении роботом-помощником космонавта на МКС // Матер. VI междуна. науч.-техн. конф. "Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем" (OSTIS-2016). Минск: БГУИР, 2016. С. 477—482.
2. **Крючков Б. И., Михайлюк М. В., Усов В. М.** Технологии моделирования для эргономического проектирования системы "космонавт — манипуляционный робот — рабочая среда" // Матер. конф. "Управление в морских и аэрокосмических сис-

темах" (УМАС-2014). СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электрон", 2014. С. 367—377.

3. **Мотненко А. И., Ронжин А. Л., Павлюк Н. А.** Современные разработки аварийно-спасательных роботов: возможности и принципы их применения // Научный вестник НГТУ. 2015. Т. 60, № 3. С. 147—165.

4. **Haynes G. C.** et al. Developing a Robust Disaster Response Robot: CHIMP and the Robotics Challenge // Journal of Field Robotics. 2017. V. 34, N. 2. P. 281—304.

5. **Kuindersma S.** et al. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the Atlas humanoid robot // Autonomous Robots. 2016. V. 40, N. 3. P. 429—455.

6. **Liu J., Zhang X., Hao G.** Survey on research and development of reconfigurable modular robots // Advances in Mechanical Engineering. 2016. V. 8, N. 8. P. 1—21. DOI: 10.1177/1687814016659597.

7. **Marques M. M.** et al. Use of multi-domain robots in search and rescue operations — Contributions of the ICARUS team to the euRathlon 2015 challenge // OCEANS 2016-Shanghai. IEEE. 2016. P. 1—7.

8. **Motienko A. I., Ronzhin A. L., Basov O. O., Zelezny M.** Modeling of Injured Position During Transportation Based on Bayesian Belief Networks // Proc. of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (ITI'16). 2016. P. 81—88.

9. **Murphy R. R.** et al. Search and rescue robotics // Springer Handbook of Robotics. 2008. P. 1151—1173.

10. **NASA Analog Mission (NEEMO).** URL: <http://www.lpi.usra.edu/lunar/strategies/NASA-Analog-Missions-NP-2011-06-395.pdf> (дата обращения 02.05.2017).

11. **Theobald D., Allen T.** Apparatus with hydraulic power module. U. S. Patent No. 9387895. 2016. URL: <https://www.google.com/patents/US9387895> (дата обращения 21.02.2017).

12. **Theobald D.** Mobile reconfigurable robot. U. S. Patent No. 8106616. 2012. URL: <http://www.google.com/patents/US8106616> (дата обращения 21.02.2017).

13. **Walker I. D., Choset H., Chirikjian G. S.** Snake-Like and Continuum Robots // Springer Handbook of Robotics. 2016. P. 481—498.

14. **Zhang Y.** et al. Motion planning and control of ladder climbing on DRC-Hubo for DARPA Robotics Challenge // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014). 2014. P. 2086.

15. **Zucker M.** et al. A General-purpose System for Teleoperation of the DRC-HUBO Humanoid Robot // Journal of Field Robotics. 2015. V. 32, N. 3. P. 336—351.

An Evacuation of a Cosmonaut in a Spacesuit During Extravehicular Activity on the Lunar Surface with Assistance of Rescue Robots

A. I. Motienko, anna.gunchenko@gmail.com✉, **A. L. Ronzhin**, ronzhin@iiias.spb.su,
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS),
Saint-Petersburg, 199178, Russian Federation,
A. A. Altunin, a.altunin@gctc.ru, **B. I. Kryuchkov**, b.kryuchkov@gctc.ru, **V. M. Usov**, v.usov@gctc.ru,
State Organization "Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center"
Star city, Moscow region, Russian Federation

Corresponding author: Motienko Anna I., Ph. D., Researcher,
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy
of Sciences (SPIIRAS), Saint-Petersburg, 199178, Russian Federation
e-mail: anna.gunchenko@gmail.com

Accepted on August 07, 2017

Today, in technologically advanced countries there are a number of scientific and technical projects to create robotic systems (RS) in various fields of medicine. The additional efforts are wanted for their practical introduction in the extreme environment, in particular, for the rescue of persons of hazardous occupations, which are most at risk when performing their professional activities. In future lunar missions, the particular attention will be necessary for assistance a crew during extravehicular activity (EVA) on the moon's surface. EVA is one of the most important types of flight's operations and requires strict fulfilling the safety requirements, when fulfilling rescue operations in emergency evacuation with using of Autonomous Mobile Robots (AMR). To select potentially suitable solutions to adapt existing land-based rescue robots to the conditions of human exploration of the Moon, it is necessary to turn an attention to the a couple of important characteristics, such as: the weight and size, the load

capacity, resistance to overturning when carrying loads comparable in mass with the mass of the robot, off-road capability across rough terrain with various densities of soil, the natural "Human Robot Interaction" on base of multimodal interfaces for remote robot control, and others. The paper gives the general representation of the problem situations on the lunar surface, when a crew in autonomy conditions has great difficulties, that are connected with the rescue and evacuation of a cosmonaut during EVA into the Lunar Lander in case of crashing the spacesuit's life support system and/or the loss of performance by a cosmonaut.

Keywords: Autonomous Mobile Robots (AMR), extra-vehicular activity (EVA) on lunar surface, space suit, disorganization of cosmonaut's performance, rescue robots

For citation:

Motienko A. I., Ronzhin A. L., Altunin A. A., Kryuchkov B. I., Usov V. M. An Evacuation of a Cosmonaut in a Spacesuit During Extravehicular Activity on the Lunar Surface with Assistance of Rescue Robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no 11, pp. 734—739.

DOI: 10.17587/mau.18.734-739

References

1. **Krjuchkov B. I., Usov V. M., Karpov A. A.** *Ontologicheskij podhod k postroeniju interaktivnoj virtual'noj sredy dlja vizual'nogo predstavlenija planiruemih dejstvij pri dialogovom upravlenii robotom-pomoshhnikom kosmonavta na MKS* (An Ontological approach to build interactive virtual environments for the visual representation of the planned action, when control of a cosmonaut's robot assistant on the ISS in dialog interaction), *Proc. of the VI Intern. scientific.-tech. Conf. "Open semantic technology of intelligent systems" (OSTIS-2016)*, Minsk, BSUIR, 2016, pp. 477—482 (in Russian).

2. **Krjuchkov B. I., Mihajljuk M. V., Usov V. M.** *Tehnologii modelirovaniya dlja jergonomicheskogo proektirovaniya sistemy "kosmonavt — manipulacionnyj robot — rabochaja sreda"* (Information Technology for ergonomic system "Cosmonaut — Manipulation robot — Working environment" design), *Materials of conference "Management in the marine and aerospace systems" (BUTTER-2014)*, SPb., JSC "Concern "CRI "Electropribor", 2014, pp. 367—377 (in Russian).

3. **Motienko A. I., Ronzhin A. L., Pavljuk N. A.** *Sovremennye razrabotki avarijno-spasatel'nyh robotov: vozmozhnosti i principy ih primenenija* (The modern development of rescue robots, opportunities and principles of their application), *Nauchnyj Vestnik NGTU*, 2015, vol. 60, no. 3, pp. 147—165 (in Russian).

4. **Haynes G. C.** et al. Developing a Robust Disaster Response Robot: CHIMP and the Robotics Challenge, *Journal of Field Robotics*, 2017, vol. 34, no. 2, pp. 281—304.

5. **Kuindersma S.** et al. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the Atlas humanoid robot, *Autonomous Robots*, 2016, vol. 40, no. 3, pp. 429—455.

6. **Liu J., Zhang X., Hao G.** Survey on research and development of reconfigurable modular robots, *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, vol. 8, no. 8, pp. 1—21, DOI: 10.1177/1687814016659597.

7. **Marques M. M.** et al. Use of multi-domain robots in search and rescue operations—Contributions of the ICARUS team to the euRathlon 2015 challenge, *OCEANS 2016-Shanghai. IEEE*, 2016, pp. 1—7.

8. **Motienko A. I., Ronzhin A. L., Basov O. O., Zelezny M.** Modeling of Injured Position During Transportation Based on Bayesian Belief Networks, *Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'16)*, 2016, pp. 81—88.

9. **Murphy R. R.** et al. Search and rescue robotics, Springer Handbook of Robotics, 2008, pp. 1151—1173.

10. **NASA Analog Mission (NEEMO)**, available at: <http://www.lpi.usra.edu/lunar/strategies/NASA-Analog-Missions-NP-2011-06-395.pdf> (accessed: 02.05.2017).

11. **Theobald D., Allen T.** Apparatus with hydraulic power module. U. S. Patent No. 9387895. 2016, available at: <https://www.google.com/patents/US9387895> (accessed: 21.02.2017).

12. **Theobald D.** Mobile reconfigurable robot. U. S. Patent No. 8106616. 2012, available at: <http://www.google.com/patents/US8106616> (accessed: 21.02.2017).

13. **Walker I. D., Choset H., Chirikjian G. S.** Snake-Like and Continuum Robots, Springer Handbook of Robotics, 2016, pp. 481—498.

14. **Zhang Y.** et al. Motion planning and control of ladder climbing on DRC-Hubo for DARPA Robotics Challenge, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014)*, 2014, pp. 2086.

15. **Zucker M.** et al. A General-purpose System for Teleoperation of the DRC-HUBO Humanoid Robot, *Journal of Field Robotics*, 2015, vol. 32, no. 3, pp. 336—351.

УДК 621.865.8-5

DOI: 10.17587/mau.18.739-744

А. Г. Лесков, д-р техн. наук, профессор, директор, agleskov@rambler.ru,

Е. В. Селиверстова, инженер, feoktistovaev@mail.ru,

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Дмитровский филиал)

Алгоритм планирования и выбора способа захвата деформируемого объекта многопалым захватным устройством манипуляционного робота

Рассмотрен алгоритм выбора способа захвата деформируемого объекта с учетом минимизации контактных сил. Отличительные особенности алгоритма — учет изменения формы поверхности объекта и смещения его центра масс, вызванных деформацией объекта в процессе захвата и выполнения манипуляционной задачи, и проверка на достижимость желаемого положения объекта на этапе планирования захвата.

Ключевые слова: симулятор захвата, планирование захвата, деформируемый объект, контактные силы, выбор способа захвата, достижимость, устойчивость

Введение. Главное достоинство робототехнических систем — возможность выполнения задач ловкого манипулирования с объектами при достаточном удалении человека от операционной зоны. Особенно актуальными являются вопросы роботизации операций при работе с взрывоопасными объектами, представляющими угрозу для жизни и здоровья человека.

На данный момент роботизированные операции с взрывоопасными объектами реализуются за

счет применения методов удаленного управления при постоянном нахождении оператора в контуре управления роботом. Однако такой способ имеет существенные недостатки. Главные из них — неспособность при потере связи между роботом и пультом управления и увеличение сложности управления при наличии задержки сигнала, что может привести к разрушению объекта манипулирования (ОМ) или его выпадению из захватного устройства (ЗУ) и, как следствие, взрыву.

Альтернативой роботам, управление которыми осуществляется удаленно человеком, являются автономные системы, оснащенные элементами искусственного интеллекта. Такие роботы лишены перечисленных недостатков и способны выполнять манипуляционные задачи в автоматическом режиме. Однако к настоящему времени не удается найти примеров полностью автономных систем, способных выполнять сложные операции с любыми ОМ. Поэтому задачу автономизации принято решать поэтапно, включая в рассмотрение отдельные фазы операции.

К простейшим манипуляционным задачам относится захват ОМ, который является начальным этапом большинства операций. Захват ОМ является проблемой его иммобилизации внутри ЗУ робота. Решение этой проблемы дает возможность удерживать ОМ в присутствии внешних возмущений.

В общем случае один и тот же ОМ можно захватить различными способами, по-разному располагая звенья ЗУ относительно поверхности ОМ. От выбора способа захвата зависит возможность реализации манипуляционной задачи и выполнения операции в целом. Выбор способа захвата осуществляется на этапе планирования. Решение задачи планирования захвата и последующего манипулирования требуют анализа результатов моделирования ОМ и ЗУ в процессе выполнения операции.

На данный момент задача автоматического захвата решена для жестких ОМ. Захват жестких ОМ интенсивно изучается уже более 30 лет. Созданы теория, описывающая кинематику и динамику захвата, алгоритмы планирования захвата и способы анализа его свойств. На их основе разработаны симуляторы захвата жестких ОМ — GraspIt! [1] и OpenRAVE [2], которые часто используются в современных робототехнических системах.

Существенным недостатком таких симуляторов захвата является отсутствие рассмотрения этой операции в контексте последующих действий, которые необходимо совершить с ОМ. Так, например, при охватывающем захвате желаемое изменение положения и ориентации ОМ в пространстве возможно только за счет движения всего манипуляционного робота. При этом, если при планировании захвата учесть последующую манипуляционную операцию, то изменения положения ОМ в пространстве можно достичь за счет движения звеньев ЗУ, что является более безопасным с точки зрения избегания столкновений с объектами, находящимися в рабочей зоне манипулятора. Кроме

того, существующие симуляторы захвата не ставят целью минимизацию сил, прилагаемых к ОМ со стороны ЗУ. Минимизация таких сил позволяет избежать чрезмерной деформации или разрушения ОМ, что особенно важно при работе с взрывоопасными объектами.

Алгоритм планирования захвата. В работе описан оригинальный алгоритм планирования захвата, учитывающий деформацию ОМ в процессе выполнения операции, последующую манипуляционную операцию и минимизацию сил, прилагаемых к ОМ со стороны ЗУ. Алгоритм реализован с использованием метаоперационной системы Robot Operating System [3]. Модель ЗУ формируется в формате Unified Robot Description Format [4]. Такое представление ЗУ облегчает способ моделирования в части решения прямой задачи кинематики при моделировании захвата. Поверхности ОМ и звенья ЗУ представлены в виде полигональных моделей.

Алгоритм планирования захвата включает в себя: алгоритм формирования гипотез захвата; алгоритм планирования траекторий движения звеньев ЗУ для захвата ОМ; алгоритм определения пересечений полигональных моделей ОМ и звеньев ЗУ; алгоритм расчета сил контактного взаимодействия между ОМ и звеньями ЗУ; алгоритм определения центра масс деформированного в процессе захвата ОМ; алгоритм оценки устойчивости захвата; алгоритм проверки достижимости желаемого положения ОМ; алгоритм планирования движения шарниров ЗУ для перемещения ОМ; алгоритм определения способа захвата.

Алгоритм формирования гипотез захвата в GraspIt! и OpenRAVE осуществляется следующим образом. Вокруг полигональной модели ОМ строится ограничивающий объем в виде сферы или параллелепипеда. Затем на ограничивающий объем накладывается сетка с заданным пользователем шагом, в вершинах которой восстанавливаются нормали к поверхности ограничивающего объема. Вдоль нормалей откладывается точка, удаленная от вершины на заданное пользователем расстояние. В эту точку устанавливается модель ЗУ таким образом, чтобы оно было направлено вдоль вектора нормали и пальцами ориентировано в сторону ОМ (рис. 1, а). После этого модель ЗУ переводится в состояние "ЗУ открыто". Моделирование захвата осуществляется путем пошагового изменения положения элементов ЗУ для перевода его в состояние "ЗУ закрыто". На некотором шаге поверхности ОМ и звена ЗУ начинают пересекаться. Когда число контактных областей становится больше двух, захват считается осуществленным. Для такого состояния проводится анализ свойств захвата и его количественная и качественная оценка. На основании результатов оценки происходит выбор наиболее удачного способа захвата.

Недостатком такого формирования гипотез захвата является использование простейших ограничивающих объемов. Для объектов, обладающих сложной формой, это приводит к малому числу ги-

потез, которые чаще всего являются "неудачными" (рис. 1, б), поскольку ЗУ находится на таком удалении от объекта, что при закрытии его звенья не касаются поверхности ОМ.

Ввиду этого в качестве ограничивающего объема в предлагаемом алгоритме планирования захвата используется многогранник, получаемый путем уменьшения числа вершин полигональной модели ОМ. Формирование гипотез осуществляется следующим образом. Рассчитываются геометрические центры полигонов ограничивающего объема, и в них восстанавливаются нормали к соответствующим полигонам. Далее, аналогично выше описанному алгоритму, вдоль нормалей откладываются точки, удаленные от центров полигонов на заданное расстояние, в которые устанавливается модель ЗУ (рис. 1, в). После этого для каждой гипотезы осуществляется моделирование захвата способом, описанным для GrasPlt! и OpenRAVE.

Алгоритм планирования траекторий движения звеньев ЗУ для захвата ОМ формирует законы изменения движения следующим образом:

$$q_{ji} = q_{jcl} + \frac{(q_{jop} - q_{jcl})}{n} i, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m,$$

где q_{ji} — обобщенная координата j -го шарнира на i -м шаге моделирования; q_{jcl} и q_{jop} — значения обобщенных координат j -го шарнира в положении "ЗУ закрыто" и "ЗУ открыто" соответственно; n — число шагов моделирования.

На каждом шаге моделирования выполняется алгоритм определения пересечений полигональных моделей ОМ и звеньев ЗУ [5]. Если пересечение не обнаружено, происходит переход на следующий шаг моделирования, иначе — выполняется алгоритм расчета сил контактного взаимодействия между ОМ и звеньями ЗУ [6], учитывающий контактные ограничения. В результате формируются множество вершин $R = \{r_1, \dots, r_m\}$, входящих в поверхность контактов, и соответствующее им множество сил контактного взаимодействия $F_R = \{f_{R1}, \dots, f_{Rm}\}$. Работу этих алгоритмов для представленного на рис. 2, а способа захвата иллюстрируют рис. 2, б и рис. 2, в.

После обнаружения пересечения и расчета сил контактного взаимодействия выполняется алгоритм определения центра масс деформированного в процессе захвата ОМ.

Вначале определяется поверхность ОМ после деформации. Изменение формы поверхности происходит не только в области контакта, но и в области, примыкающей к кон-

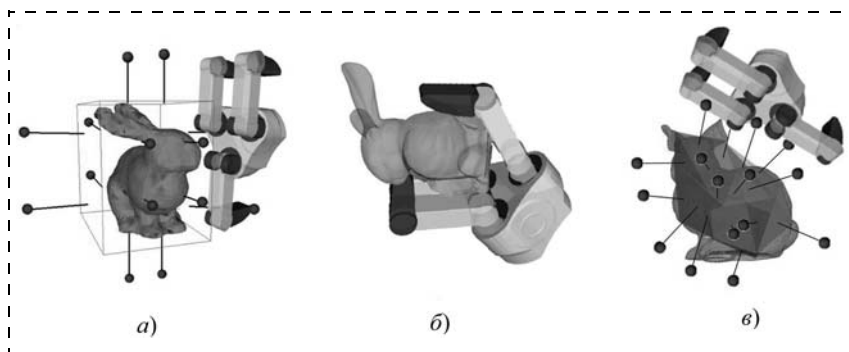


Рис. 1. Формирование гипотез захвата

тактной поверхности. Расчет смещений вершин, входящих в область, примыкающую к контактной поверхности, осуществляется итеративно. Вначале определяются смещения вершин q_i , которые образуют полигоны с вершинами, входящими в поверхность контактов. Затем рассчитываются смещения вершин, которые образуют полигоны с вершинами q_i и так далее до тех пор, пока смещение не станет меньше малой заданной величины. В итоге формируется множество вершин, входящих в область, примыкающую к контактной поверхности, и испытывающих смещение в процессе деформации объекта — $Q = \{q_1, \dots, q_t\}$.

В основе физической модели деформации лежит приближение Буссинеска [7]. Вектор смещения u_{Qi} для вершины q_i :

$$u_{Qi} = \frac{1-\nu}{2\pi G} \sum_{k=1}^n \frac{f_{Rk}}{l_k}, i = 1, 2, \dots, t,$$

где ν — коэффициент Пуассона; G — модуль сдвига; l_k — расстояние между вершиной q_i и r_k , к которой приложена точечная сила f_{Rk} . Учитывая неизменяемость объема ОМ, определяются смещения вершин, не входящих в область, примыкающей к контактной.

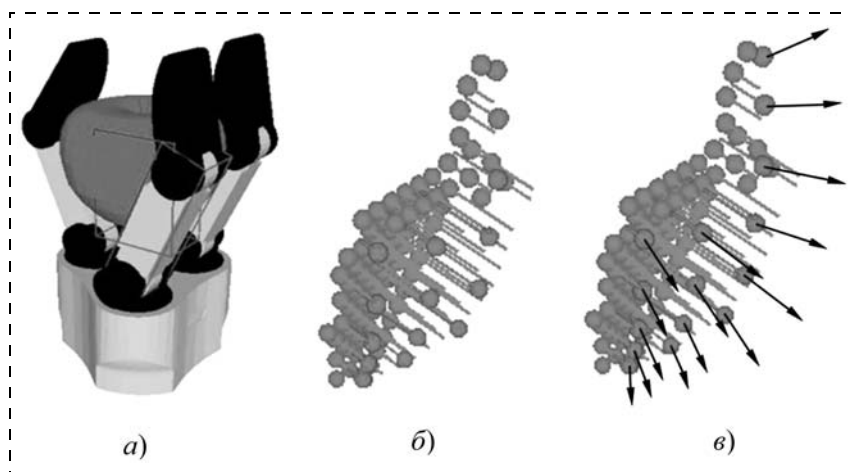


Рис. 2. Определение наличия пересечения и расчет сил контактного взаимодействия

Для определения центра масс деформированного ОМ его полигональная модель разбивается трехмерной сеткой. Определяются ячейки, которые находятся внутри модели деформированного ОМ, и ячейки, внутри которых находятся вершины модели. Каждой такой ячейке назначается весовой коэффициент v_i , эквивалентный объему. В итоге радиус-вектор центра масс C отыскивается из соотношения:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^k v_i l_i}{\sum_{i=1}^k v_i},$$

где l_i — радиус-вектор каждой ячейки.

Результат работы алгоритма представлен на рис. 3. На рис. 3, *a* изображен недеформированный ОМ и положение его центр масс, на рис. 3, *б* — деформированный ОМ, на рис. 3, *в* — найденный центр масс деформируемого ОМ.

Далее выполняется алгоритм оценки устойчивости захвата, который основан на проверке выполнения неравенства [8]

$$w_{ext} \leq -G\gamma_{con}, \quad (1)$$

где G — матрица захвата [8], которая рассчитывается на каждом шаге моделирования, поскольку изменяются положение центра масс ОМ и точек приложения равнодействующих сил в каждой кантатной области; w_{ext} и γ_{con} — блочные векторы внешнего воздействия и контактных сил и моментов:

$$w_{ext} = [f \ \mu]^T, \ \gamma_{con} = [f_1 \ \mu_1 \ \dots f_i \ \mu_i \ \dots f_n \ \mu_n]^T,$$

где f и μ — равнодействующие сила и крутящий момент, приложенные к ОМ со стороны внешнего мира; f_i и μ_i — равнодействующие сила и крутящий момент, приложенные к ОМ со стороны ЗУ в i -й контактной области.

Если условие (1) не выполняется, на следующем шаге моделирования продолжается движение всех шарниров модели ЗУМ. Движение осуществляется до тех пор, пока неравенство не будет выполнено.

Затем выполняется алгоритм проверки достижимости желаемого положения ОМ, т. е. определе-

ния возможности выполнения последующей манипуляционной задачи. Для этого отыскивается решение матричного уравнения

$$q = J^{-1} G^T u, \quad (2)$$

где q — вектор, составленный из значений углов шарниров захватного устройства; J — матрица Якоби [8]; u — вектор, описывающий положение и ориентацию ОМ; G — матрица захвата.

Если уравнение (2) не имеет решение, то при таком способе захвата желаемое положение ОМ является недостижимым, и гипотеза захвата исключается из дальнейшего рассмотрения.

Далее выполняется алгоритм планирования движения шарниров ЗУ для перемещения ОМ. Траектория ОМ полагается линейной. Она разбивается на заданное число шагов. Для каждого промежуточного положения ОМ отыскивается положение центра контактной области. Затем путем решения обратной кинематической задачи [9] определяется предварительная конфигурация ЗУ для всех промежуточных положений.

Затем моделируется захват ОМ для каждого промежуточного положения, уточняются силы, с которыми звенья ЗУ действуют на ОМ, положение центра масс ОМ, матрица захвата. После этого рассчитывается блочный вектор контактных сил и моментов, при котором захват является устойчивым. Он определяется из решения матричного уравнения (1):

$$\gamma_{conmin} = G^+ w_{ext} + (I - G^+ G) y_{min},$$

где G^+ — псевдообратная матрица к матрице захвата G ; I — единичная матрица; y_{min} — произвольный вектор, который выбирается таким образом, чтобы вектор γ_{conmin} был минимальным; $(I - G^+ G)$ — базис нуль-пространства матрицы захвата, определяющего подпространство внутренних сил и моментов.

Далее сравниваются значения сил, полученных в результате моделирования, и сил, полученных в результате расчета. На основе этого сравнения происходит коррекция значений углов шарниров ЗУ таким образом, чтобы силы, полученные в результате моделирования, были близки к расчетным значениям, но не были их меньше.

В конце выполняется алгоритм определения способа захвата, который в качестве входных параметров принимает положение ОМ относительно манипуляционного робота. Результатом работы алгоритма является гипотеза захвата, для достижения предзахватного положения которой траектория манипулятора в обобщенных координатах минимальна и отсутствует столкновение между исполнительным механизмом и объектами внешнего мира на протяжении выполнения всей манипуляционной операции.

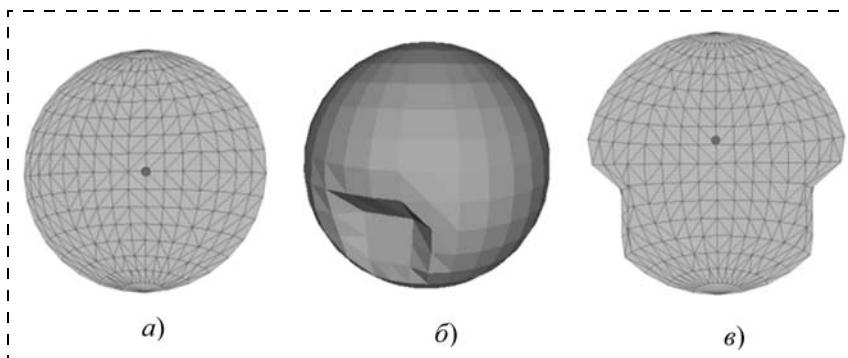


Рис. 3. Определение центра масс деформируемого объекта в процессе захвата

Заключение. Таким образом, в работе описан алгоритм симулятора захвата. Отличительными особенностями рассмотренного симулятора захвата от существующих алгоритмов планирования захвата являются:

- проверка на достижимость желаемого положения ОМ на этапе планирования захвата;
- минимизация сил, прикладываемых к поверхности ОМ со стороны ЗУ;
- учет изменения формы поверхности ОМ и смещения его центра масс, вызванных деформацией ОМ в процессе захвата и выполнения манипуляционной задачи.

В дальнейшем планируется развитие алгоритмов анализа контактных сил в процессе выполнения манипуляционной операции.

Список литературы

1. Miller A., Allen P., Graspat A. Versatile simulator for robotic grasping // IEEE Robot. Autom. Mag. 2004. Vol. 11, N. 4. P. 110–122.
2. Diankov R. Automated construction of robotic manipulation programs. Ph. D. thesis, Carnegie Mellon University, Robotics Institute, 2010.

3. Robot Operating System, available at: <http://www.ros.org/> (дата обращения: 22.05.2017).
4. Unified Robot Description Format, available at: <http://wiki.ros.org/urdf> (дата обращения: 22.05.2017).
5. Лесков А. Г., Селиверстова Е. В. Расчет областей пересечения поверхностей захватных устройств манипуляторов и деформируемых объектов при планировании и моделировании захвата // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана, Сер. Приборостроение, 2016, № 6. С. 97–114.
6. Лесков А. Г., Селиверстова Е. В. Расчет сил контактного взаимодействия между деформируемым объектом и звеньями захватного устройства манипулятора // Труды Международной Научно-Технической Конференции "Экстремальная робототехника", 2016. С. 129–133.
7. Леденев В. В., Однолько В. Г., Нгуен З. Х. Теоретические основы механики деформирования и разрушения, Тамбов; Изд-во ФГБОУ ВПО "ТГТУ", 2013, 312 с.
8. Praticchizzo D., Bicchi A. Consistent task specification for manipulation systems with general kinematics // ASME Journal of Dynamics Systems Measurements and Control. 1997. Vol. 113. P. 760–767.
9. Лесков А. Г., Бажинова К. В., Морозкин С. Д., Феоктистова Е. В. Построение модели кинематики исполнительных механизмов манипуляционных роботов с использованием блочных матриц // Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научно-техническое издание. 2013. № 9 (21). URL: <http://engjournal.ru/articles/954/954.pdf> (дата обращения: 22.05.2017).

Algorithm for Planning and Selection of Deformable Object Grasp by Multi-Finger Gripper of Robotic Manipulator

A. G. Leskov, agleskov@rambler.ru, E. V. Seliverstova, feoktistovaev@mail.ru,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Seliverstova Elena V., Engineer,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation,
e-mail: agleskov@rambler.ru

Accepted on August 07, 2017

Principal advantage of robotic systems is the ability to perform tasks of dexterous manipulation with objects with sufficient removal of the person from the operating area. Particularly relevant are issues of robotics operations when working with explosive objects that pose a threat to human life and health. The simplest manipulation tasks include object grasping, which is the initial stage of most operations. Grasp of object is a problem of its immobilization inside the robot's gripper. Solving this problem makes it possible to hold object in the presence of external perturbations. An algorithm for selection of deformable object grasp is considered, taking into account the minimization of contact forces. Distinctive features of the algorithm — taking into consideration the change in the shape of the object's surface and the displacement of its center of mass, caused by deformation of the object during grasping and execution of the manipulation task, and verification of the object desired position reachability at the grasp planning stage. The algorithm for grasp planning includes: an algorithm for generating grasp hypotheses; algorithm for planning the trajectories of gripper's links for object grasping; algorithm for determining the intersections of object's and gripper's links' polygonal model; algorithm for calculating the forces of contact interaction between object and gripper's links; algorithm for determining the center of mass of the object, deformed during grasping; algorithm for estimating the stability of grasp; algorithm for verifying the reachability of the object desired position; algorithm for planning the gripper's joints movement for moving object during manipulation task; algorithm for determining the grasp method.

Keywords: grasp simulator, grasp planning, deformable object, contact forces, choice of grasp method, reachability, stability

For citation:

Leskov A. G., Seliverstova E. V. Algorithm for Planning and Selection of Deformable Object Grasp by Multi-Finger Gripper of Robotic Manipulator, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no 11, pp. 739–744.

DOI: 10.17587/mau.18.739-744

References

1. Miller A., Allen P., Graspat A. Versatile simulator for robotic grasping, *IEEE Robot. Autom. Mag.*, 2004, vol. 11, no. 4, pp. 110–122.

2. Diankov R. Automated construction of robotic manipulation programs. Ph. D. thesis, Carnegie Mellon University, Robotics Institute, 2010.
3. Robot Operating System, available at: <http://www.ros.org/> (date of access: 22.05.2017).
4. Unified Robot Description Format, available at: <http://wiki.ros.org/urdf> (date of access: 22.05.2017).
5. Leskov A. G., Seliverstova E. V. Raschet oblastey peresecheniya poverkhnostey zakhvatnykh ustroystv manipulyatorov i deformiruyemykh obyektoy pri planirovaniy i modelirovaniy zakhvata (Computation of surface intersections of gripping devices and deformed objects during planning and modelling of grip), *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. Priborostryeniye*, 2016, vol. 6, pp. 97–114 (in Russian).

6. Leskov A. G., Seliverstova E. V. *Raschet sil kontaktного vzaimodeystviya mezhdu deformiruyemyim ob'yektom i zven'yami zakhvatnogo ustroystva manipulyatora* (Computation of contact interaction forces between deformed object and units of manipulator gripping device), *Trudy Mezhdunarodnoy Nauchno-Tekhnicheskoy Konferentsii "Ekstremalnaya Robototekhnika"*, 2016, pp. 129—133 (in Russian).

7. Ledenev V. V., Odnolko V. G., Nguyen Z. H. *Teoreticheskiye osnovy mekhaniki deformirovaniya i razrusheniya* (Theoretical Foundations of Deformation and Fracture Mechanics), Tambov, Publishing house of FGBOU VPO "TG TU", 2013, 312 p. (in Russian).

8. Prattichizzo D., Bicchi A. Consistent task specification for manipulation systems with general kinematics, *ASME Journal of Dynamics Systems Measurements and Control*, 1997, vol. 113, pp. 760—767.

9. Leskov A. G., Bazhinova K. V., Moroshkin S. D., Feoktistova E. V. *Postroyeniye modeley kinematiki ispolnitel'nykh mekhanizmov manipulyatsionnykh robotov s ispol'zovaniyem blochnykh matrits* (Model building of kinematics for servo units of manipulating robots using partition matrices), *Inzhenernyy Zhurnal: Nauka i Innovatsii. Elektronnoye Nauchno-Tekhnicheskoye Izdaniye*, 2013, no. 9 (21), available at: <http://engjournal.ru/articles/954/954.pdf> (date of access: 22.05.2017). (in Russian).

УДК 001.4:004.2:007.52

DOI: 10.17587/mau.18.744-748

В. Н. Казанцев, канд. техн. наук, зам. нач. сектора, kazantsev@rtc.ru,

В. А. Павлов, канд. техн. наук, стар. науч. сотр., зам. нач. сектора, vapavlov@rtc.ru,
ГНЦ РФ "Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт
робототехники и технической кибернетики", г. Санкт-Петербург

Терминология и подходы к определению модульной структуры роботов¹

Рассмотрен общий подход к интерпретации существующей терминологии и применению классификации модульности компонентов сервисных роботов. Концепции разработки модульной архитектуры роботов рассмотрены с позиций компонентного и функционального подходов. Представлен краткий обзор разрабатываемых в настоящее время методов морфотроники и тактно-канального метода для структурного проектирования роботов.

Ключевые слова: робот, модульность, модуль, модульная архитектура робота

В международном стандарте [1], выпущенном тремя международными организациями ИСО, МЭК и IEEE, дано следующее определение модульности: "*Модульность (modularity):* качество, при котором система или компьютерная программа состоит из дискретных компонентов таких, что у которых изменения в одном компоненте оказывают минимальное влияние на другие компоненты". Такие компоненты и являются модулями в соответствии с определением из проекта международного стандарта ИСО [2]: "*Модуль (module):* компонент с особыми свойствами, обеспечивающими удобство проектирования, интероперабельность, легкость реконфигурирования, простоту интеграции и т. д.". Например, при проектировании модуль может рассматриваться в виде "черного ящика", для интеграции модуль должен иметь доступные интерфейсы, а интероперабельность обеспечивается унификацией и стандартизацией интерфейсов. При этом любые изменения, производимые внутри "черного ящика", никак не влияют или оказывают минимальное влияние на работу других модулей системы.

Существуют несколько классификаций модулей. По функциональному признаку модули подразделяются на основные, вспомогательные, специальные и адаптивные [3]. Кроме того, модули могут быть необходимыми и возможными.

Основные модули являются необходимыми для системы и должны обязательно присутствовать в системе, например, манипулятор робота. Они реализуют основные функции системы непосредственно или в комбинации с другими модулями.

Вспомогательные модули реализуют вспомогательные функции системы, поддерживающие выполнение основных функций, которые реализуются основными модулями, например модули, обеспечивающие энергообеспечение или смазку. Вспомогательные модули включаются в систему вместе с обслуживаемыми ими основными модулями. Вспомогательные модули, как правило, являются необходимыми.

Специальные модули создаются для реализации функций, специфичных для конкретных задач, которые не относятся к функциям, присущим системе для всех случаев ее применения, например, захватное устройство манипулятора, предназначенное для работы с конкретным типом объектов. В данной классификации специальные модули являются возможными модулями, так как они являются возможными дополнительными аксессуарами для основных модулей.

Адаптивные модули реализуют функции адаптации к другим системам или ограничивающим условиям. Характеристики адаптивных модулей не полностью фиксируются заранее и, следовательно, позволяют их настраивать в зависимости от конкретных условий применения. Примером могут быть модули, обеспечивающие изменение клиренса

¹ Результаты исследований были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 8.9364.2017/8.9.

мобильного робота в зависимости от условий местности. Адаптивные модули могут быть как необходимыми, так и возможными.

Отдельно в данной классификации выделяются компоненты, специфичные для конкретного заказчика, которые не реализуются модулями, входящими в базовое исполнение модульной системы. Такие специфические функции могут быть реализованы не в модульном исполнении.

По структурному признаку модули классифицируются как *базовые* (входные, обрабатывающие, выходные и инфраструктурные), *составные* (состоят из нескольких базовых модулей) и *главные* (состоят из нескольких базовых и/или составных модулей, являются аналогом основных модулей по функциональной классификации) [2]. Модули могут быть аппаратными и/или программными.

Входной модуль (input module): тип модуля, предназначенный для сбора информации и данных, сигналов или команд, которые необходимы для эффективного функционирования модуля, робота или системы роботов. Примером являются сенсоры систем осязания или модули ввода команд пользователя. Базовые входные программные модули соответствуют базовым входным аппаратным модулям. Примерами базовых программных модулей являются модули, воспринимающие сигналы от датчиков и телевизионных камер, воспринимающие сигналы от тактильных датчиков, воспринимающие звуковые сигналы, модули ввода данных от пользователя и т. д.

Выходной модуль (output module): тип модуля, предназначенный для выработки и/или доставки информации и данных, сигналов, энергии, мощности или работы, которые необходимы для эффективного функционирования робота или системы роботов. Примером являются исполнительные приводы для перемещения робота или части робота. Более сложные модули исполнительных приводов, включающие сенсоры, драйверы, микропроцессорные узлы и силовую электронику, относятся к составным выходным модулям.

Обрабатывающий модуль (processing module): тип модуля, предназначенный для преобразования данных, сигналов и информации в соответствии с назначением модуля, например, часть аппаратных средств, необходимых для поддержки выполнения алгоритмов и предоставления инфраструктуры системам управления исполнительными устройствами. Обрабатывающим программным модулям не требуется доступ к аппаратным модулям через слой абстракции, так как они реализуют только вычислительные алгоритмы, например, планирование траектории, решение задачи обратной кинематики, фильтрацию, математические расчеты, навигацию, распознавание и т. д. Обрабатывающие программные модули могут быть как базовыми, так и составными в зависимости от их сложности. Обрабатывающие программные модули получают входные данные от входных программных модулей и

посылают выходные данные выходным программным модулям.

Инфраструктурный модуль (infrastructure module): тип модуля, реализующий основные возможности и сервисы, необходимые для конфигурирования и реконфигурирования модулей робота при создании конкретных реализаций робота. Примерами аппаратных инфраструктурных модулей являются блок питания, шина питания, шина данных или механический корпус. К программным инфраструктурным модулям относится промежуточное программное обеспечение (middleware). Интеллектуальный источник питания робота является составным инфраструктурным модулем.

Общие абстрактные определения и наименования модулей конкретизируются при описании модульной архитектуры конкретного класса роботов. Классификация модулей по функциональному признаку разработана для машиностроительной продукции и малоприменима для описания структуры систем. Структурная классификация модулей в большей степени ориентирована на описания модулей различных систем и подсистем робота, но использовать ее для описания модульной структуры механических устройств достаточно сложно. При определении модульной структуры роботов целесообразно использовать обе классификации.

Общей технологии проектирования модульной архитектуры роботов в настоящее время не существует. Сформированы скорее различные для аппаратных средств и программного обеспечения роботов подходы, принципы и некоторые вспомогательные методы структурного анализа.

Для разработки модульной архитектуры аппаратных средств используются компонентный и/или функциональный подходы. При *компонентном подходе* структура изделия описывается с помощью так называемой "Матрицы структурного проектирования" (англ. Design Structure Matrix, DSM), представляющей собой обычную матрицу смежности, расширенную столбцом и строкой входных и выходных воздействий [4]. Заголовки столбцов и строк матрицы соответствуют входам и выходам компонентов, расположенных на главной диагонали матрицы. Связи компонентов в ячейках матрицы инструментальными программными средствами DSM классифицируются по типам связей: механическая, гидравлическая и т. д. Матрица, составленная, например, из главных компонентов робота, может быть декомпозирована простой вставкой вместо компонента на главной диагонали соответствующей этому компоненту DSM матрицы. Декомпозиция выполняется до уровня типовых технических решений и заимствованных компонентов.

В целях структурного анализа матрица DSM приводится к треугольному виду для расслоения структуры связей между компонентами. Операция преобразования, в силу разреженности структурных матриц, выполняется методом уплотнения. Все связи исходной матрицы сохраняются, но столбцы

или строки треугольной матрицы будут соответствовать определенному слою в структуре компонентов робота. Обратные связи при уплотнении остаются симметричными относительно главной диагонали матрицы. Для определения модулей в структуре робота используется операция кластеризации компонентов. Например, сформировав метрику оценки связности группы компонентов с другими элементами структуры робота и используя генетические алгоритмы, можно определить группы компонентов с минимальной внешней связностью, которые и будут являться возможными вариантами модулей в структуре изделия. Применение матрицы DSM для определения модульной архитектуры особенно эффективно при большом числе компонентов в составе робота. Метод DSM поддерживается инструментальными средствами Loomo, Cambridge Advanced Modeller, Lattix Enterprise Suite и другими программными инструментами.

Функциональное модульное проектирование архитектуры применяется для анализа состава функций, реализующих требования технического задания и декомпозиции функций на подфункции (операции) в целях определения состава модулей, реализующих функционал проектируемого робота. Для функционального модульного проектирования разработан метод развертывания функции модульности (англ. Modular Function Deployment, MFD) [5], основу которого составляет построение специальной морфологической таблицы, называемой "Матрица идентификации модулей" (англ. Module Identification Matrix, MIM). Заголовки столбцов таблицы содержат наименования *независимых друг от друга функций* проектируемого изделия и типов модулей (базовый, составной, главный), реализующих эти функции. Заголовки строк таблицы содержат следующий перечень факторов, влияющих на возможность реализации функции в изделии в виде отдельного модуля:

1. Компонент или система не будут перепроектироваться в течение жизненного цикла робота (заимствованное техническое решение или необходимость в серьезных инвестициях в технологии производства). В некоторых случаях компоненты или системы ожидаемо будут модифицироваться, и для сохранения модульной архитектуры изделия их также следует объединить в отдельный модуль.

2. Существует несколько вариантов реализации функции с различными спецификациями, учитывающих различные требования заказчика и вероятные их изменения. Возможно создание одного унифицированного модуля или ряда модулей с унифицированными интерфейсами.

3. Функция реализуется компонентом, используемым во всех изделиях модельного ряда.

4. Существующий технологический процесс позволяет реализовать функцию в виде отдельного модуля.

5. Функция реализуется унифицированным или заимствованным компонентом, прошедшим испытания перед поставкой.

6. Компоненты объединяются в один модуль для облегчения технического обслуживания, ремонта и замены.

7. Заказчику предоставляется возможность самостоятельно вносить изменения в изделие путем замены модуля.

8. Компоненты объединяются в один модуль для облегчения или обеспечения безопасности утилизации.

Перечень факторов модульности зависит от назначения проектируемого изделия и может уточняться. В матрице идентификации модулей каждой функции изделия выставляется экспертная оценка степени использования факторов модульности. Функции с наибольшими суммарными оценками отбираются для их реализации в виде отдельных модулей. Отобранные модули являются опорными точками для дальнейшего проектирования модульной архитектуры изделия. Для функций, отобранных для реализации в виде отдельных модулей, разрабатываются матрицы MIM с подфункциями второго уровня иерархии и т. д. В результате формируется иерархическое дерево модулей. Листьями дерева являются типовые (заимствованные) технические решения или новые компоненты, дальнейшая декомпозиция которых на подфункции нецелесообразна. Разработка модульной архитектуры является итерационной процедурой, чередующей подходы к проектированию "сверху-вниз" и "снизу-вверх". Функциональный подход разработки модульной архитектуры сервисных мобильных роботов базируется на поведенческих моделях целевого назначения робота. Например, для медицинских роботов на передний план при проектировании модульной архитектуры выступают оценки риска и минимизация возможного ущерба здоровью.

Во многих случаях из-за сложности и новизны проектируемого изделия обобщенную архитектуру системы составить экспертным путем с достаточной степенью достоверности не представляется возможным. Подход к формальному синтезу обобщенной архитектуры систем рассмотрен в работе [6], где предложена многомерная модель для моделирования сложных систем, получившая наименование "морфотроника", которая является некоторым обобщением понятия "мехатроника". Слагаемое "морфо" в словосочетании означает форму, структуру, сеть, организацию и вместе со словом "мехатроника" определяет некоторую структуру, состоящую из мехатронных устройств. В теории морфотроники предлагается новый класс преобразований для определения оптимальных взаимодействий, которые связывают *идеальную* коммуникационную модель системы с внешними контекстными условиями. С использованием аппарата неевклидовой геометрии разработан инструментальный контекстного моделирования и определения операций про-

ектирования идеальной структуры системы, являющейся прообразом обобщенной архитектуры. Концепция морфотроники базируется на теории бондграфов [7]. В теории бондграфов физические процессы в системе любой природы описываются процессами перераспределения энергии в анализируемой системе. Вводится обобщенная система характеристик. Например, обобщенному потоку в морфотронике соответствуют линейная и угловая скорости в механических системах, сила тока в электрических системах, объем расхода в гидравлических и пневматических системах; обобщенному усилию соответствуют сила и крутящий момент в механике, напряжение в электротехнике и давление в гидравлике. Аналогично вводятся и другие обобщенные характеристики. Таким образом, используя принципы теории бондграфов, можно с единых позиций описать процессы в смешанных системах, состоящих из механических, электронных, гидравлических и других устройств, причем этот подход распространяется и на описание динамических систем с использованием хорошо известного в теории управления метода пространства состояний. Бондграфы строятся не на общих рассуждениях, а на строгом формальном выводе с изменениями компонентов тензора преобразования в соответствии с переменными моделируемой системы. Энергетические модели могут быть полезны для описания обобщенных структур роботов космического назначения и роботов, предназначенных для функционирования в нескольких средах.

Одним из подходов, дополняющих обычные методы проектирования архитектур роботов, является функциональный подход, разрабатываемый Институтом проектирования изделий (IPEK) Технологического университета Карлсруэ. В публикации [8] представлены следующие основные понятия разработанного в IPEK контактно-канального подхода (Contact & Channel Approach) для комплексного моделирования функций, релевантных физическим свойствам механических систем.

Рабочие поверхности (Working Surfaces, WS) формируются парами (Working Surface Pairs, WSP) всех попарных интерфейсов между компонентом и его окружением. Это может быть твердая поверхность тела или границы с поверхностями жидкостей, газов или полей, которые находятся в постоянном или случайном контакте с рабочей поверхностью. Они принимают участие в обмене энергией, материалами и информацией в рамках технической системы.

Канальные и опорные конструкции (Channel and Support Structures, CSS) представляют собой физические компоненты, объемы жидкостей, газов или пространственных поддерживающих полей, которые соединяют только две рабочие поверхности пар.

Ограничивающие поверхности (Limiting Structures, LS) являются поверхностями, которые не участвуют в выполнении функций рассматриваемой

системы, но являются потенциальными рабочими поверхностями.

Для моделирования мехатронных систем с динамическими структурами контактно-канальный подход дополняется конструкциями унифицированного языка моделирования UML2 инструментальной среды инженерного проектирования систем SysML, разработанной в 2007 году группой OMG. В IPEK для SysML разработано расширение CCA, позволяющее моделировать функциональную архитектуру системы с использованием контактно-канального подхода. Функциональные компоненты контактно-канального подхода последовательно моделируются на диаграммах деятельности, диаграммах компонентов и связываются с физическими системами. В работе [9] подробно обсуждается синтез сустава руки гуманоидного робота Armar III с использованием контактно-канального подхода. На первом этапе проектирования была создана укрупненная функциональная структура для передачи движения и энергии от локтевого сустава к кисти робота с обратной связью о выполняемых движениях. На втором этапе было найдено принципиальное решение задачи передачи движения в любом направлении и спроектирован двухканальный прототип сустава. На третьем этапе была описана функциональная архитектура изделия. Канальные конструкции CSS_i, характеризующие функциональное назначение компонентов, сопрягались через попарные интерфейсы WSP_j и формировали матрицу DSM. Весовой фактор I_{CSS} каждого компонента в ячейке матрицы рассчитывался в зависимости от веса коэффициента W_{WSP} функционального взаимодействия компонента с другим компонентом и весовых факторов S_{CSS} компонентов, участвующих во взаимодействии. Модульность конструкции оценивалась по индексу удовлетворения конструкции требованиям модульности, т. е. минимальной связности с компонентами, не входящими в состав модулей. Кластеризация элементов в исходной DSM матрице была выполнена с использованием генетического алгоритма. Были выявлены четыре кластера, которые в дальнейшем стали конструктивными модульными компонентами сустава руки робота. Применение контактно-канального подхода позволяет представить мехатронные устройства роботов в виде системы компонентов, имеющих входы и выходы, и использовать системное представление для разработки модульных конструкций.

Представленные в публикациях различные определения терминов, связанных с модульным подходом к разработке промышленной продукции, объясняются различными точками зрения к моделированию модульных структур. Например, с функциональной точки зрения реализация функций в виде отдельных модулей эквивалентна обеспечению минимальной связности модулей с другими компонентами с точки зрения структурного подхода. Структурный подход предполагает менее жест-

кие требования к модульной архитектуре промышленной продукции и поэтому представляется более приемлемым для использования при проектировании модульных роботов.

Список литературы

1. **ISO/IEC/IEEE 24765:2010** Systems and software engineering — Vocabulary.
2. **ISO/NP 22166-1:2016** Robotics — Modularity for service robots. Part 1: General requirements.
3. **Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K.-H.** Engineering Design: A Systematic Approach. Springer, 2007.
4. **Browning T. R.** Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and new

Directions // IEEE Transactions on Engineering Management. 2001. Vol. 48, N. 3.

5. **Erixon G.** The Chart of Modular Function Deployment. Stockholm: Centre for Industrial Engineering at Dalarna University, 1998.
6. **Resconi G., Chaczko Z.** Morphotronic System (theory) // Computer Aided Systems Theory/EUROCAST. 2009.
7. **Воронин А. В.** Моделирование мехатронных систем. Томск: Изд. Томского ПУ, 2008.
8. **Albers A., Zingel C.** Extending SysML for Engineering Designers by Integration of the Contact & Channel — Approach (C & C²-A) for Function-Based Modeling of Technical Systems // Procedia Computer Science. 2013. Vol. 16.
9. **Albers A., Korkiat S., Sauter C., Burger W.** A Method to define a Product Architecture Early in Product Development Using the Contact and Channel Model // Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Design Methods and Tools (pt. 1). 2009. Vol. 5. Palo Alto, CA, USA.

Terminology and Approaches to a Definition of Modular Robot Structure

V. N. Kazantsev, kazantsev@rtc.ru✉, **V. A. Pavlov**, vapavlov@rtc.ru,
Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics,
Saint-Petersburg, 194064, Russian Federation

Corresponding author: **Kazantsev V. N.**, Ph. D., Senior Research Scientist,
Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics,
Saint-Petersburg, 194064, Russian Federation
e-mail: kazantsev@rtc.ru

Accepted on August 07, 2017

A general approach to an interpretation of the existing terminology and to an application of the service robot component modularity classifications is considered. Classifications of modules according to functional and structural criteria are presented. Classification of modules according to functional criterion was developed for machine-building products and it is of little use for robot structure description. Structural classification is oriented on a modular presentation of various robot subsystems but it is rather hard to use it to describe modular mechanical structures. Concepts of the modular robot architecture development are considered from positions of the component and functional approaches. The component approach is based on the Design Structure Matrix that gives a possibility to optimize the modular robot structure according to an objective function. The functional approach is used to analyze a composition of the robot functions and to decompose functions onto sub-functions to determine a modular composition of the robot. A brief overview of the morphotronic methods being developed currently and the contact & channel method used for the robots structural design is presented. Morphotonics is a new approach to the formal synthesis of the generalized system architecture. The contact & channel method enables to represent mechatronic robotic devices as a composition of components with inputs and outputs and to develop modular structures.

Keywords: robot, modularity, module, modular robot architecture

Acknowledgements: The results of the research were obtained in the framework of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 8.9364.2017/8.9.

For citation:

Kazantsev V. N., Pavlov V. A. Terminology and Approaches to a Definition of Modular Robot Structure, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 744—748.

DOI: 10.17587/mau.18.744-748

References

1. **ISO/IEC/IEEE 24765:2010** Systems and software engineering — Vocabulary.
2. **ISO/NP 22166-1:2016** Robotics — Modularity for service robots. Part 1: General requirements.
3. **Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K.-H.** Engineering Design: A Systematic Approach, Springer, 2007.

4. **Browning T. R.** Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and new Directions, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2001, vol. 48, no. 3.

5. **Erixon G.** The Chart of Modular Function Deployment, Centre for Industrial Engineering at Dalarna University, Stockholm, 1998.

6. **Resconi G., Chaczko Z.** Morphotronic System (theory), *Computer Aided Systems Theory/EUROCAST*, 2009.

7. **Voronin A. V.** *Modelirovanie mekhatronnykh sistem* (Modelling of Mechatronic Systems), Tomsk, Publishing house of Tomskii PU, 2008 (in Russian).

8. **Albers A., Zingel C.** Extending SysML for Engineering Designers by Integration of the Contact & Channel — Approach (C & C²-A) for Function-Based Modeling of Technical Systems, *Procedia Computer Science*, 2013, vol. 16.

9. **Albers A., Korkiat S., Sauter C., Burger W.** A Method to define a Product Architecture Early in Product Development Using the Contact and Channel Model, *Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Design Methods and Tools (pt. 1)*, 2009, vol. 5, Palo Alto, CA, USA.

Ю. В. Подураев, д-р техн. наук, проф.,
зав. кафедрой робототехники и мехатроники, директор института, y.poduraev@stankin.ru,
Московский государственный технологический университет "СТАНКИН",
Институт автоматизации и робототехники

Подход и опыт проектирования медицинской коллаборативной робототехники для лазерной хирургии и биопринтинга¹

Проведен анализ современных тенденций развития и методов построения коллаборативных медицинских робототехнических систем. Предложен подход к проектированию медицинской коллаборативной робототехники, который направлен на целенаправленный научно-технический поиск роботических и мехатронных технологий, позволяющих принципиально превысить возможности естественных систем человека при выполнении медицинских операций. Приводятся результаты разработки исследовательских прототипов медицинских роботов и их экспериментального тестирования на операциях лазерной челюстно-лицевой хирургии и биопринтинга, выполненных совместно специалистами Московского государственного технологического университета "СТАНКИН" и Московского государственного медико-стоматологического университета им. А. И. Евдокимова.

Ключевые слова: коллаборативная робототехника, медицинский робот, роботические технологии, мехатронные технологии, роботы для лазерной хирургии, роботы для биопринтинга

Введение

Масштабное развитие индустрии робототехники открывает новые перспективы в использовании роботов и роботических комплексов. Главной особенностью современных роботов является то, что они должны взаимодействовать в одном рабочем пространстве вместе с человеком. Появление манипуляторов, оборудованных специальными встроенными сенсорными и интеллектуальными устройствами, дало возможность развития нового поколения робототехнических систем — коллаборативных. В настоящее время коллаборативные роботические системы тестируются в различных сферах научной и производственной деятельности, одной из наиболее значимых из которых является медицина.

Основной целью коллаборации робототехники и медицины является повышение эффективности лечения и уменьшение рисков нанесения вреда здоровью человека при выполнении обследования или операции. Научно-методическая проблематика медицинской коллаборативной робототехники обусловлена в значительной степени междисциплинарной сущностью ее предмета. Перед разработчиками робото-медицинских систем и технологий стоят уникальные проектные задачи, которые затрагивают предметные основы столь ранее обособленных областей научных и прикладных знаний, как медицина и инженерия. При этом требуется искать эффективные проектные решения на системном пересечении и синергетическом сочетании современных достижений в этих областях. Важно отметить, что в последние годы резко возрос интерес к робото-медицинским системам, что свидетельствует о высоком интересе научного сообщества к данному направлению [1–4].

Постановка задачи

Анализ современных тенденций в развитии коллаборативной медицинской робототехники показал, что актуальной задачей является переход к роботам-хирургам от роботов-ассистентов [1–3]. Роботы-хирурги способны под контролем врача автономно выполнять отдельные операции с функциональными показателями, многократно превышающими мануальные возможности человека при работе с аналогичными медицинскими инструментами (например, медицинскими лазерами, лапароскопами и др.) [4, 5].

Функциональные возможности роботов-хирургов предусматривают:

- строгое соблюдение роботом плана и ограничительных условий, установленных врачом;
- оперативный контроль хода роботической операции врачом в режиме реального времени;
- работу системы безопасности пациента, включающей комплекс информационно-измерительных и аппаратно-программных устройств защиты;
- дружелюбный интерфейс "Врач — Робот", предусматривающий предварительную компьютерную симуляцию операции и визуализацию операционной зоны;
- персонализацию операционного плана для пациента путем использования индивидуальных 3D-графических моделей объектов и зоны операционного вмешательства;
- автоматическую генерацию программ движений робота-хирурга в CAD—CAM-системе;
- использование интеллектуальной системы поддержки решений для оптимизации программ движения робота и режимов работы медицинского инструмента.

Методы исследования

Предлагаемый подход к проектированию медицинской коллаборативной робототехники включает следующие основные этапы:

¹ Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (задание № 9.3408.2017/4.6).

Этап 1. Анализ эффективности мануальных технологий и операций, выполняемых врачами-хирургами с использованием современных медицинских инструментов.

Этап 2. Формирование функциональных требований, совокупности критериев и показателей эффективности операций. Выделение доминирующих критериев и областей варьирования.

Этап 3. Определение актуальных областей для разработки коллаборативной медицинской робототехники, где принципиально достижимо (на сегодняшнем уровне инженерных знаний и состояния техники) существенное превышение медицинским роботом естественных характеристик механических, сенсорных и интеллектуальных систем человека.

Этап 4. Выбор существующего робота (манипулятора и системы управления) и разработка оригинальных программного обеспечения, медицинских рабочих органов, информационных и сенсорных устройств.

Этап 5. Альтернативный вариант: разработка и изготовление оригинального манипулятора и/или оригинальной системы управления, превосходящих имеющиеся аналоги современных роботов по заданным техническим характеристикам.

На базе предложенного подхода разработаны исследовательские прототипы медицинских роботов, предназначенных для лазерной челюстно-лицевой хирургии и биопринтинга, которые были выполнены совместно специалистами Московского государственного технологического университета "СТАНКИН" и Московского государственного медико-стоматологического университета им. А. И. Евдокимова [1].

В состав роботизированного multifunctional хирургического комплекса (МХК) для лазерной челюстно-лицевой хирургии входят манипуляционный робот-хирург, мануальный тренажерный комплекс, фантом головы пациента и рабочее место хирурга (рис. 1, см. третью сторону обложки).

Робот-хирург реализован на базе манипулятора KUKA LBR 4 + и включает лазерный медицинский инструмент, прототип рабочего органа, лазерную координатно-измерительную машину с программным пакетом для обработки данных и оптическую систему безопасности.

На основе проведенного анализа типовых движений и траекторий медицинского инструмента при проектировании использовались следующие функциональные критерии:

- среднеквадратическое отклонение от линейной (полулунной, фестончатой) траектории — отклонение в каждой точке от ее проекции на среднюю линию;
- погрешность значения воздушного зазора между наконечником лазера и обрабатываемой биологической тканью;
- погрешность средней скорости движения медицинского инструмента;

- среднеквадратическое отклонение от средней скорости движения медицинского инструмента.

Экспериментальное тестирование работы МХК на фантоме челюсти показало, что показатели робота-хирурга существенно выше мануальных возможностей врача на лазерных операциях. Проведенные эксперименты доказали, что точность поддержания роботом заданного значения воздушного зазора между наконечником лазера и биологической тканью лучше в 7 раз, стабильность скорости движения лазера лучше в 4 раза. Погрешность отклонения от заданной траектории роботом лучше мануальных показателей в 3...4 раза (в зависимости от вида траектории).

Перспективным направлением для развития коллаборативной робототехники являются технологии роботического биопринтинга. Основу технологии биопринтинга составляет 3D-печать, т. е. послойное создание физического объекта на базе виртуальной трехмерной модели. В качестве физического объекта в биопринтинге выступают живые органы или отдельные их элементы, которые впоследствии пересаживаются пациенту [6—8]. Применение роботических и мехатронных технологий в биопринтинге не только позволяет улучшить качество печати и разрешающую способность биопри- нтера, дает возможность печатать органы с более сложной структурой, но и позволяет перейти к качественно новому этапу развития регенеративной медицины, т. е. биопечати *in vivo* (внутри живого организма) и *in situ* (на месте). Актуальная научная проблематика в области роботического биопринтинга заключается в создании нового вида роботических систем и робото-медицинских технологий для принципиально новых задач биофабрикации на базе аддитивных роботических технологий послойного синтеза как совокупности органических и неорганических слоев. Роботические системы нового поколения отличает повышенная безопасность пациента благодаря использованию оригинального CAD/CAM программного обеспечения, 3D-визуализации операционной зоны, силовых и интегральных сенсоров, применению новых методов и измерительно-информационных устройств роботов.

На рис. 2 (см. третью сторону обложки) представлен экспериментальный стенд роботической биопечати эмали *in situ* для замены поврежденных или утраченных в результате болезни или травмы участков эмали. Разработка выполнена специалистами МГТУ СТАНКИН, Московского государственного медико-стоматологического университета им. А. И. Евдокимова и компании 3D Bioprinting Solutions.

Заключение

В статье предложен общий подход к проектированию медицинской коллаборативной робототехники. Выработаны критерии, позволяющие количественно оценить эффект от внедрения робототех-

нической системы по сравнению с мануальными операциями, выполняемыми человеком.

Рассмотрен разработанный и успешно протестированный мультифункциональный хирургический комплекс (МХК) для лазерной челюстно-лицевой хирургии. МХК доказал возможность использования роботов в медицинской практике. Выполнение операций при этом происходит с большей точностью и стабильностью по скорости по сравнению с человеком, что говорит о перспективности использования роботизированных комплексов в сфере челюстно-лицевой хирургии. Исследованы перспективы аддитивных технологий (биопринтинга) и возможность их реализации на основе готовых робототехнических решений. Разработанная экспериментальная система показывает принципиальную возможность реализации технологий биопринтинга на базе существующих робототехнических комплексов.

Дальнейшая работа включает в себя глубокое исследование точностных и динамических характеристик, необходимых для выполнения хирургических и аддитивных операций, разработку и улучшение программного обеспечения для 3D-визуализации операционной зоны, проектирование сенсорных систем, а также разработку дружественного человека машинного интерфейса.

Список литературы

1. Буйнов М. А., Воротников А. А., Климов Д. Д., Малышев И. Ю., Миронов В. А., Парфенов В. А., Перейра Д. А. С., Подураев Ю. В., Хесуани Ю. Д. Роботические технологии в медицине и биопринтинге: состояние проблемы и современные тенденции // Вестник МГТУ "Станкин". 2017. № 1 (40).
2. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=a2SdbM4qWkU&feature=youtu.be>
3. Колонтарев К. Б., Пушкарь Д. Ю., Говоров А. В., Шептунов С. А. История развития роботических технологий в медицине // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Медицинские науки. 2014. № 4 (32). С. 125—140.
4. Базилян Э. А., Чунихин А. А. Малоинвазивные лазерные технологии на основе роботизированных мультифункциональных комплексов в челюстно-лицевой хирургии и стоматологии // Российский стоматологический журнал. 2016. Т. 20, № 5. С. 228—231.
5. Чунихин А. А., Саакян М. Ю., Гажва С. И., Базилян Э. А. Разработка наносекундного лазерного модуля, встраиваемого в роботизированный многофункциональный хирургический комплекс для малоинвазивной терапии патологии челюстно-лицевой области и определение эффектов его воздействия на плазму крови // Современные технологии в медицине. 2016. Т. 8, № 4. С. 30—35.
6. Mironov V., Kasyanov V., Markwald R. Organ printing: from bioprinter to organ biofabrication line // Current Opinion in Biotechnology. 2011. N. 22. P. 667—673.
7. Manyi Wang, Jiankang He, Yaxiong Liu, Meng Li, Dichen Li, Zhongmin Jin. The trend towards in vivo bioprinting // International Journal of Bioprinting. 2015. Vol. 1, N. 1. P. 15—26.
8. Миронов В. А. Технология трехмерной биопечати. URL: http://umedp.ru/news/vladimir_aleksandrovich_mironov_tekhnologiya_trekhmernoy_biopec_hati.html. Дата доступа 30.03.2017.
9. Каган В. Г. 50, 40, 30, 20, 10 лет спустя (размышления после IMTS-2000 и PKM-2). М.: ПАСХН, 2003. 76 с.

Approach and Experience of Designing Medical Collaborative Robotics for Laser Surgery and Bio-Printing

Yu. V. Poduraev, y.poduraev@stankin.ru✉,
Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, 127994, Russian Federation

Corresponding author: Poduraev Yury V., D. Sc., Professor, Director of the Institute of Automation and Robotics, Head of Robotics & Mechatronics Dept., Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, 127994, Russian Federation, e-mail: y.poduraev@stankin.ru

Accepted on August 14, 2017

The analysis of modern development trends and methods of construction of collaborative medical robotic systems is carried out. An approach is proposed for the design of medical collaborative robotics, which is aimed at a purposeful scientific and technical search for new robotic and mechatronic technologies. The goal of developing new technologies is a significant excess of the capabilities of natural human systems in the performance of medical operations. In the following work, the state and development trends of medical robotics such as autonomous robotic surgery and recently found application in a medical field additive manufacturing are studied. Design approach applicable to the relatively new medical collaborative robotics is proposed. Several mathematical criteria with respect to both engineering and medical aspects are developed. Based on the analysis of typical movements and trajectories of the medical instrument, the following functional criteria were used in the design:

- the standard deviation from a linear (semilunar, scalloped) trajectory is the deviation value at each point from its projection to the midline;
- the error in the magnitude of the air gap between the laser tip and the treated biological tissue;
- accuracy of the average speed of movement of a medical instrument;
- standard deviation from the average speed of movement of a medical instrument.

Components of efficient surgery robot are described. Results of the development of two experimental setups for the maxillofacial laser surgery robotic system and robotic based 3D bio-printing 'in situ', respectively, are given. Proposed systems exceed the capabilities of human in the performance of medical operations, and can be a basis for the development of principally new maxillofacial laser surgery and 3D bio-printing robotic based systems. This work accomplished by collaboration of Moscow State Technological University "STANKIN" and Moscow State University of Medicine and Dentistry named after A. I. Evdokimov.

Keywords: collaborative robotics, medical robot, robotic technology, mechatronic technologies, robots for laser surgery, robots for bioprinting

Acknowledgements: The work was supported by grant of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project No. № 9.3408.2017/4.6).

For citation:

Poduraev Y. V. Approach and Experience of Designing Medical Collaborative Robotics for Laser Surgery and Bio-Printing, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 749–752.

DOI: 10/17587/mau.18.749-752

References

1. **Bujnov M. A., Vorotnikov A. A., Klimov D. D., Malyshev I. Yu., Mironov V. A., Parfenov V. A., Perejra D. A. S., Poduraev Yu. V., Hesuani Yu. D.** *Roboticheskie tekhnologii v medicine i bioprintinge: sostoyaniye problemy i sovremennyye tendentsii* (Robotic technologies in medicine and bioprinting: the state of the problem and current trends), *Vestnik MGTU "STANKIN"*, 2017, no. 1 (40) (in Russian).
2. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=a2SdbM4qWkU&feature=youtu.be>
3. **Kolontarev K. B., Pushkar' D. Yu., Govorov A. V., Sheptunov S. A.** *Istoriya razvitiya roboticheskikh tekhnologiy v medicine* (History of the development of robotic technologies in medicine), *Izvestiya Vuzov. Povolzhskiy region. Medicinskie nauki*, 2014, no. 4 (32), pp. 125–140 (in Russian).

4. **Bazikyan Eh. A., Chunihiin A. A.** *Maloinvazivnyye lazernyye tekhnologii na osnove robotizirovannykh multifunktsional'nykh kompleksov v chelyustno-litsevoj hirurgii i stomatologii* (Minimally invasive laser technologies based on robotic multifunctional complexes in maxillofacial surgery and dentistry), *Rossiyskiy Stomatologicheskij Zhurnal*, 2016, vol. 20, no. 5, pp. 228–231 (in Russian).

5. **Chunihiin A. A., Saakyan M. Yu., Gazhva S. I., Bazikyan Eh. A.** *Razrabotka nanosekundnogo lazernogo modulya, vstraivayemogo v robotizirovannyj mnogofunktsional'nyj hirurgicaleskij kompleks dlya maloinvazivnoy terapii patologii chelyustno-litsevoj oblasti i opredelenie ehffektov ego vozdeystviya na plazmu krovi* (Development of a nanosecond laser module embedded in a robotic multifunctional surgical complex for minimally invasive treatment of the pathology of the maxillofacial area and determining the effects of its effect on blood plasma), *Sovremennyye Tekhnologii v Medicine*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 30–35 (in Russian).

6. **Mironov V., Kasyanov V., Markwald R.** Organ printing: from bioprinter to organ biofabrication line, *Current Opinion in Biotechnology*, 2011, no. 22, pp. 667–673.

7. **Manyi Wang, Jiankang He, Yaxiong Liu, Meng Li, Dichen Li, Zhongmin Jin.** The trend towards in vivo bioprinting, *International Journal of Bioprinting*, 2015, vol. 1, no. 1, pp. 15–26.

8. **Mironov V. A.** *Tekhnologiya trekhmernoy biopechati* (Technology of three-dimensional bioprinting), available at: http://umedp.ru/news/vladimir_aleksandrovich_mironov_tekhnologiya_trekhmernoy_biopec_hati.html (in Russian).

9. **Kagan V. G.** 50, 40, 30, 20, 10 let spustya (50, 40, 30, 20, 10 years later), Moscow, RASKHN, 2003, 76 p. (in Russian).

УДК 004.896

DOI: 10.17587/mau.18.752-758

Д. Н. Степанов, нач. лаборатории, dnstepanov@rtc.ru, **Е. Ю. Смирнова**, нач. отдела, eus@rtc.ru,
Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики,
Санкт-Петербург

Метод коррекции оценки положения мобильного робота с использованием визуальной локации естественных ориентиров

Представлен подход к использованию визуальной локации известных ориентиров для повышения точности навигации мобильного робота (МР). Подход основывается на анализе изображений от одной или нескольких телевизионных камер МР и применении нелинейной фильтрации для коррекции навигационной оценки по визуальной локации. Ключевыми достоинствами является возможность коррекции положения и ориентации МР по любому числу ориентиров (начиная с одного), а также возможность использования произвольного числа камер. Проведенные экспериментальные исследования показали, что метод позволяет достичь погрешностей по смещению в плоскости дороги порядка 10 см и менее 1° по углу ориентации МР в пределах всей траектории.

Ключевые слова: мобильный робот, автономное транспортное средство, визуальная навигация, визуальная локация, техническое зрение, фильтр Калмана, комплексирование, оптимальная фильтрация

Введение

Задача определения положения беспилотного автомобиля (мобильного робота) при движении по дорогам общего пользования и пересеченной местности в настоящее время чаще всего решается с применением комплекса дорогостоящих многолучевых лазерных дальномеров (лидаров). Активное развитие систем технического зрения позволяет создавать значительно менее дорогие и громоздкие системы, базирующиеся на анализе изображений от телевизионных камер мобильных роботов (МР). В ряде случаев такие системы по-прежнему дополняются относительно дешевыми однолучевыми лидарами небольшого радиуса действия для конт-

роля положения транспортного средства на проезжей части. Однако существуют ситуации, когда такой дальномер использован быть не может, например, при проезде перекрестков он не позволяет определить края проезжей части и дорожной разметки. В таких ситуациях МР приходится полагаться только на использование GPS (ГЛОНАСС) и внутренних сенсоров и систем — одометров и БИНС [1]. Это ограничивает точность прохождения перекрестков, приводит к резкому маневрированию при выезде с перекрестка (когда лидар снова может быть применен для определения полосы движения) и потенциально может приводить к столкновениям с дорожной инфраструктурой.

Система технического зрения позволяет парировать указанные недостатки и в целом повышать точность навигации. Ряд известных публикаций предлагает использовать для визуальной локации маркеры специального типа — пассивные или активные [2]. Несмотря на очевидные преимущества специально разработанных маркеров (надежность обнаружения препятствий при относительно небольших вычислительных затратах), размещение таких маркеров обычно затруднительно как в помещениях, где работают люди (например, из соображений эргономики), так и в условиях открытой местности. Поэтому актуальной является задача использования для навигации "естественных" визуальных ориентиров, которые уже существуют в рабочей зоне МР.

Известными подходами применения СТЗ для навигации без специальных маркеров являются визуальный SLAM [3] и визуальная одометрия [4], однако они не позволяют достигать необходимой точности, особенно при маневрировании на месте, когда движение камер МР является в значительной степени вращательным. При наличии карты визуальных ориентиров возможно применение СТЗ для определения направлений на такие ориентиры в каждый момент времени. Существующие решения предлагают решение частных задач при ограничении на минимальное необходимое число ориентиров. Так, в работе [5] представлено решение задачи определения только ориентации МР (одна координата) с использованием трех и более ориентиров.

Предлагаемый подход основан на применении расширенного фильтра Калмана для эффективного комплексирования данных "традиционной" навигационной системы и визуальной локации произвольного числа ориентиров. При этом прогноз положения МР осуществляется с использованием одометрии ("традиционной" навигационной системы МР в общем случае), а информация, получаемая при наблюдении ориентиров, используется для коррекции оценки положения.

Основные подходы к проблеме обнаружения произвольных ориентиров изложены в публикациях [6—9]. Одним из лучших по производительности и качеству обнаружения объектов алгоритмов по данным разных исследований на данный момент является каскадный классификатор, основанный на принципах, заложенных в работе [6]. Актуальной альтернативой являются также нейронные сети глубокого обучения [10], однако для их эффективного обучения необходимо использовать очень большие наборы исходных данных (образцов объектов). Наши экспериментальные исследования [11] показывают, что при ограниченной обучающей выборке (до нескольких тысяч образцов на класс) каскадные классификаторы имеют преимущество перед нейронными сетями. Нейронные сети можно эффективно использовать для широко распро-

страненных ориентиров, таких как дорожные знаки, светофоры и т. п.

Модель движения мобильного робота

В качестве наиболее близкой модели движения используемого транспортного средства выбрана модель с поворотными передними колесами (Ackermann Steering Model) [12], показанная на рис. 1.

Кинематические уравнения движения определяются формулами

$$\begin{aligned}\dot{x} &= V\cos\theta; \\ \dot{y} &= V\sin\theta; \\ \dot{\theta} &= \frac{V\operatorname{tg}\Phi}{L},\end{aligned}$$

где $X = (x, y, \theta)$ — координаты транспортного средства; V — скорость движения; L — расстояние между задней и передней осями; Φ — угол поворота колес.

Записывая уравнения в приращениях относительно временного шага Δt , получим изменение вектора состояния при переходе от шага k к шагу $k + 1$ (нелинейная модель движения):

$$X_k = \begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ \theta_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k + \Delta t V \cos \theta_k \\ y_k + \Delta t V \sin \theta_k \\ \theta_k + \frac{\Delta t V \operatorname{tg} \Phi_k}{L} \end{bmatrix}.$$

Вектор управления имеет вид

$$u_k = \begin{bmatrix} V_k \\ \Phi_k \end{bmatrix} + w_k;$$

$$w_k = N \left(0, \begin{bmatrix} \sigma_V^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\Phi^2 \end{bmatrix} \right),$$

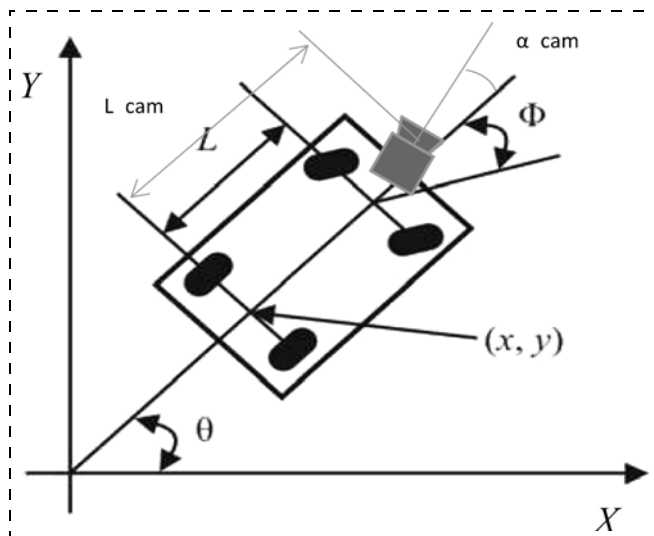


Рис. 1. Модель транспортного средства с поворотными колесами

где V_k — скорость движения; Φ_k — угол поворота колес; w_k — ошибка обработки управления (нормальное двумерное распределение с нулевым средним).

Поскольку экспериментальное транспортное средство не оснащено датчиком скорости, в качестве оценки V_k мы используем среднее изменение показаний двух одометров за время Δt :

$$V_k = \frac{2\pi A_k r_{wheel}}{N\Delta t},$$

где A_k — среднее изменение показаний двух одометров за время Δt ; r_{wheel} — радиус колеса; N — число отсчетов одометра на один полный оборот колеса.

Для определения угла поворота колес Φ_k используются данные датчика положения линейного актуатора и эмпирическая функция пересчета этих данных в угол поворота.

Формулировка расширенного фильтра Калмана для визуальной локации

Поскольку модель движения (и наблюдений в случае использования коррекции по направлениям на ориентиры) является нелинейной, для прогноза и коррекции положения необходимо использовать обобщенный (расширенный) фильтр Калмана — Extended Kalman Filter [13] (EKF).

Задание начального состояния EKF выполняем следующим образом. Положение транспортного средства в начальный момент времени:

$$X_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix}.$$

Реальное положение известно с ошибкой. Достоверность оценки начального положения описывается начальным состоянием ковариационной матрицы ошибок P :

$$P_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{x0}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y0}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta0}^2 \end{bmatrix}.$$

Шаг прогноза (time update) расширенного фильтра Калмана задается в виде:

$$\hat{X}_k^- = f(\hat{X}_{k-1}^-, u_{k-1});$$

$$P_k^- = F_k P_{k-1} F_k^T + W_k Q_{k-1} W_k^T,$$

где $\hat{X}_{k-1}^-$ — вектор состояния в момент времени $k-1$; $\hat{X}_k^-$ — вектор состояния в момент времени k ;

u_{k-1} — вектор управления; f — функция движения;

P_k^- — ковариационная матрица ошибок после прогноза; P_{k-1} — ковариационная матрица ошибок до прогноза; W_k — якобиан частных производных функции f по отношению к вектору управления; F_k — якобиан f по отношению к вектору состояния.

В рассматриваемом случае:

- матрица ковариаций ошибок управления

$$Q_k = Q = \begin{bmatrix} \sigma_V^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\Phi^2 \end{bmatrix};$$

- якобиан по отношению к вектору состояния

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -V_k \Delta t \cos \theta_k \\ 0 & 1 & V_k \Delta t \sin \theta_k \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

- якобиан по отношению к вектору управления

$$W_k = \begin{bmatrix} \Delta t \cos \theta_k & 0 \\ \Delta t \sin \theta_k & 0 \\ \frac{\Delta t \tan \Phi_k}{L} & \frac{\Delta t V_k \sec^2 \Phi_k}{L} \end{bmatrix}.$$

Наблюдения (угловые координаты визуальных ориентиров) применяются на шаге коррекции EKF, который выполняется асинхронно с шагом прогноза, в соответствии с частотой обработки кадров. Коррекция применяется к моменту времени, когда был получен кадр с обнаруженным ориентиром.

В общем виде функция наблюдений записывается в виде

$$z_k = h(x_k, v_k).$$

Здесь v_k — вектор ошибки наблюдений, имеющий нормальное гауссово распределение с матрицей ковариаций $R_k = [\sigma_\alpha^2]$.

В случае непосредственной локации m визуальных ориентиров с угловыми координатами α_i , $i = 1, \dots, m$, имеем:

$$\alpha_i = z = \arctg \frac{y_b - y_c}{x_b - x_c} - \theta_{cam} - \alpha_{cam};$$

$$x_c = x + L_{cam} \cos \theta_{cam} - T_{cam} \sin \theta_{cam};$$

$$y_c = y + L_{cam} \sin \theta_{cam} - T_{cam} \cos \theta_{cam},$$

где (x_b, y_b) — координаты текущего ориентира; L_{cam} , T_{cam} , θ_{cam} — координаты камеры в СК МР.

Шаг коррекции в такой формулировке выполняется последовательно для всех m ориентиров, угловые координаты которых определены для кадра, полученного в момент времени k .

Коррекция оценки вектора состояния из априорной оценки в апостериорную $\hat{x}_k^- \rightarrow \hat{x}_k^+$ выполняется в соответствии с формулами

$$\begin{aligned}\hat{x}_k^+ &= \hat{x}_k^- + K_k(z_k - h(\hat{x}_k^-)); \\ K_k &= P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1}; \\ P_k^+ &= (I - K_k H_k) P_k^-.\end{aligned}$$

Здесь K_k — коэффициент обратной связи; h — функция наблюдений, вычисленная для априорной оценки положения $\hat{x}_k^-$; P_k^- — априорное значение ковариационной матрицы ошибок (после шага прогноза); P_k^+ — апостериорное значение ковариационной матрицы ошибок; I — единичная матрица; H_k — якобиан частных производных функции наблюдений h , вычисленный по отношению к вектору состояний X ; R_k — матрица ковариаций наблюдений.

Соответствующий якобиан в частных производных имеет вид (в обозначениях опущен индекс "cam"):

$$H_k = \begin{bmatrix} \frac{y_b - L \sin \theta - T \cos \theta - y}{(x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x)^2 \left(\frac{(y_b - L \sin \theta - T \cos \theta - y)^2}{(x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x)^2} + 1 \right)} \\ - \frac{1}{(x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x) \left(\frac{(y_b - L \sin \theta - T \cos \theta - y)^2}{(x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x)^2} + 1 \right)} \\ \frac{\frac{T \sin \theta - L \cos \theta}{x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x} - (L \sin \theta - T \cos \theta) \frac{y_b - L \sin \theta - T \cos \theta - y}{(x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x)^2}}{\frac{(y_b - L \sin \theta - T \cos \theta - y)^2}{(x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x)^2} + 1} - 1 \end{bmatrix};$$

$R_k = [\sigma_\alpha^2]$ — дисперсия угла визирования ориентира.

Основными параметрами описанного фильтра Калмана являются:

- достоверность начальной оценки положения — матрица ковариаций оценки начального положения

$$P_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{x0}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y0}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta 0}^2 \end{bmatrix};$$

- достоверность прогноза (управления) — матрица ковариаций управления

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_V^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\Phi^2 \end{bmatrix};$$

- достоверность измерения направления на ориентир — дисперсия оценки углового положения ориентира

$$R_k = [\sigma_\alpha^2];$$

- достоверность определения угла ориентации робота — дисперсия оценки угла ориентации

$$R_k = [\sigma_\tau^2];$$

- достоверность определения положения робота — ковариационная матрица оценки положения

$$R_k = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 \end{bmatrix}.$$

Помимо этого необходимо учитывать наличие ошибки в построении карты, что на уровне модели представляется в виде стандартного отклонения координат маркера на плоскости σ_{map} . Эта величина не участвует в вычислениях фильтра Калмана и используется только для моделирования.

Экспериментальные исследования

Для отработки представленного метода разработана компьютерная модель с использованием пакета MATLAB. Ниже представлены результаты моделирования проездов без коррекции (рис. 2), с коррекцией по одному (рис. 3), двум (рис. 4) и трем ориентирам (рис. 5). На этих рисунках единицы измерения по осям абсцисс и ординат — смещения относительно системы координат полигона в метрах. Черные кружки — реальное положение МР, кресты — математическое ожидание оценки положения, эллипсы показывают неопределенность в оценке положения (на основе матрицы ко-

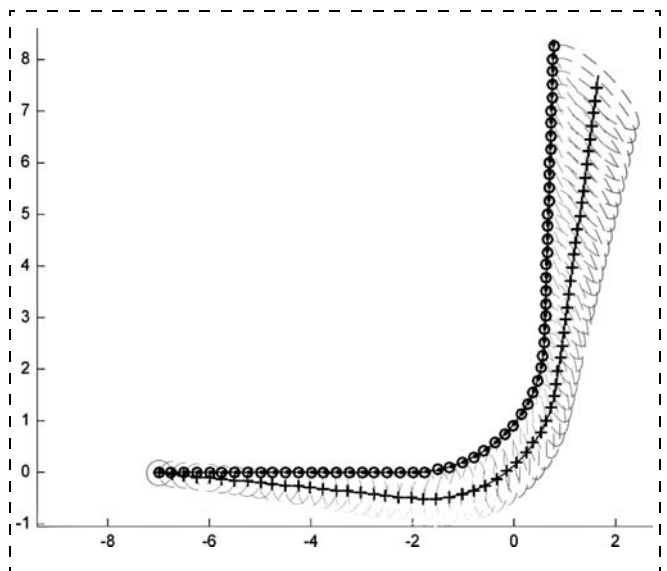


Рис. 2. Моделирование проезда без коррекции

вариации). На рис. 3—5 справа приведено увеличенное изображение одного из шагов коррекции.

Видно, что со временем ошибка в оценке положения накапливается. При этом истинное положение находится внутри эллипса неопределенности, что говорит о корректности модели.

В случае периодической коррекции по ориентиру (показан звездочкой) оценка координат в на-

правлении, ортогональном линии визирования (сплошная линия, соединяющая ориентир и реальное положение МР; неопределенность в оценке угла визирования показана штриховыми линиями), становится более достоверной. Поскольку при совершении маневра направление визирования ориентира меняется, это позволяет эффективно снижать ошибку навигации во всех направлениях.

Видно, что даже применение одного ориентира позволяет избежать неконтролируемого накопления ошибки со временем, которое возникает при использовании одометрии и БИНС.

Использование двух ориентиров позволяет сразу обеспечить коррекцию по двум направлениям. Однако по мере удаления от ориентиров направления на них становятся близки, что приводит к накоплению поперечной ошибки.

Применение трех ориентиров обеспечивает дальнейшее повышение точности навигации в пределах всего тестового участка.

Моделирование показало эффективность коррекции даже по одному ориентиру. При этом важно осуществлять коррекцию с достаточной частотой, поскольку применение линеаризации в алгоритме расширенного фильтра Калмана предполагает малые отклонения от реального положения. При больших отклонениях фильтр может давать оценку, значительно отличающуюся от оптимальной (из-за ошибок линеаризации).

Реальные камеры в большинстве случаев имеют ограниченный угол зрения, что приводит к невозможности использования одной камеры для локации ориентиров в пределах всего тестового участка. Для решения этой проблемы предлагается использовать две и более камер, направленных в разные стороны (например, вперед и назад). Моделирование и последующие натурные эксперименты показали эффективность такой схемы.

Натурные экспериментальные исследования проводились на тестовом полигоне ЦНИИ РТК с использованием автономного транспортного средства с поворотными колесами. МР оснащен бортовым вычислителем на базе Nvidia Jetson TX1 и двумя телевизионными камерами с объективами типа "рыбий глаз" для обеспечения локации ориентиров в максимально широком угле. Для определения фактического положения робота в конт-

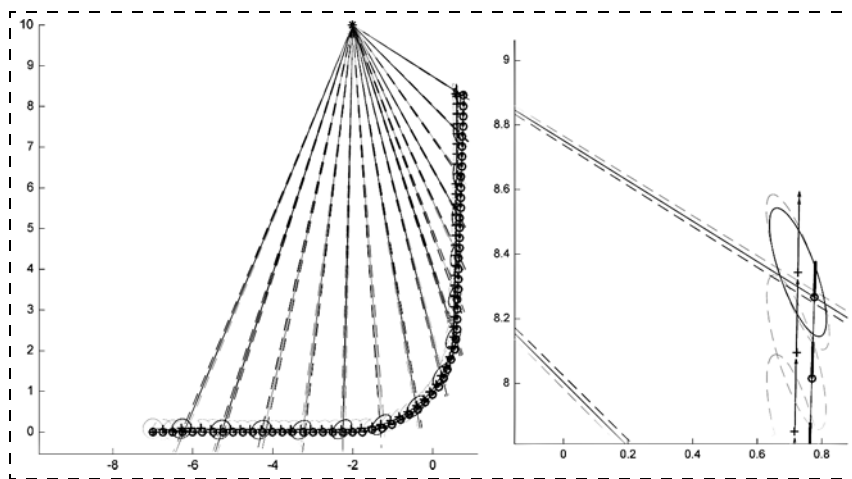


Рис. 3. Моделирование проезда с коррекцией по одному ориентиру

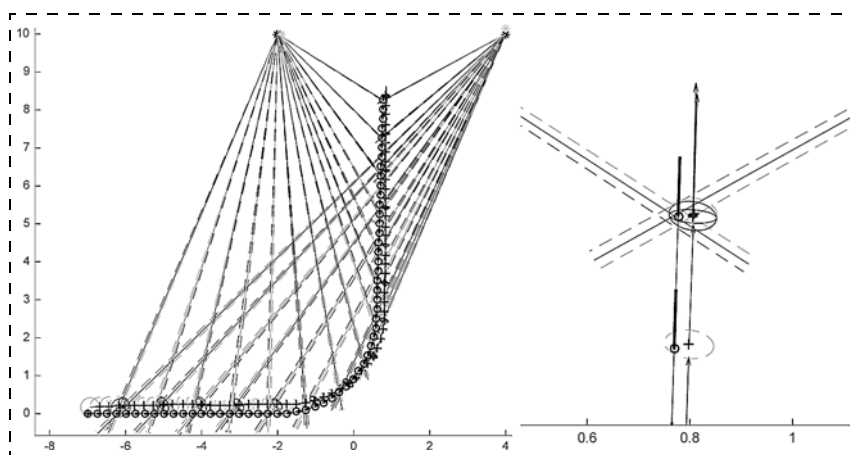


Рис. 4. Моделирование проезда с коррекцией по двум ориентирам

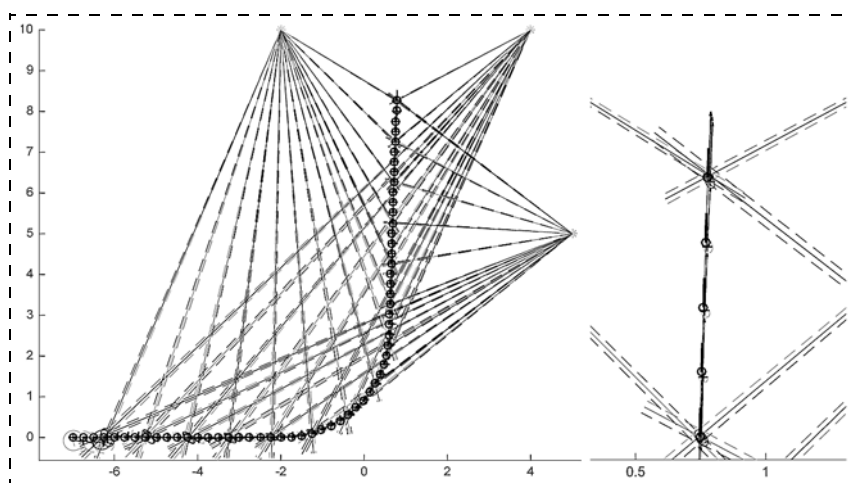


Рис. 5. Моделирование проезда с коррекцией по трем ориентирам

рольных точках использовались лазерные дальномеры, теодолит и измерительный манипулятор FARO Arm Prime.

Примеры изображений визуальных ориентиров, полученных от камер МР, представлены на рис. 6.

Экспериментальные исследования показали, что при отсутствии коррекции транспортное средство осуществляет навигацию с погрешностью порядка 50 см в конечной точке контрольной траектории (аналогичной проезду перекрестка с поворотом). Применение визуальной коррекции позволяет достичь погрешности не более 10 см в том же положении МР.

Заключение

Ключевым достоинством представленного подхода является возможность коррекции по любому числу ориентиров (начиная с одного), а также использования как одной, так и множества телевизионных камер. Однократное наблюдение ориентира с известными координатами обеспечивает уменьшение ошибки навигации в направлении, перпендикулярном линии визирования ориентира. Поскольку каждый ориентир обычно наблюдается в течение некоторого времени, даже при использовании только одного ориентира постепенно может быть списана ошибка по всем координатам. Проведенные экспериментальные исследования показали, что метод позволяет достичь точностей порядка 10 см при проезде перекрестков различной конфигурации. При этом точность не уменьшается по мере продвижения по траектории. Предложенный подход является универсальным и может быть применен для коррекции по известным визуальным ориентирам в различных случаях, например, при определении относительного положения автономных спасательных средств морского базирования [14], космических аппаратов [15] или при выполнении стыковки автономных необитаемых подводных аппаратов с носителем [16].

Список литературы

1. Черноножкин В. А., Половко С. А. Система локальной навигации для наземных мобильных роботов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2008. № 57. С. 13—22.
2. Тюкин А. Л., Лебедев И. М., Приоров А. Л. Анализ телевизионного изображения для работы системы позиционирования мобильного робота в помещении по маякам с цветовой кодировкой // Тезисы научно-технической конференции "Техническое зрение в системах управления — 2015". 2015. С. 77—78.
3. Raftl Mur-Artal, J. M. M. Montiel and Juan D. Tardós. ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System // IEEE Transactions on Robotics. 2015. Vol. 31, N. 5. P. 1147—1163.
4. Девятериков Е. А., Михайлов Б. Б. Использование данных визуального одометра для автономного возвращения мо-

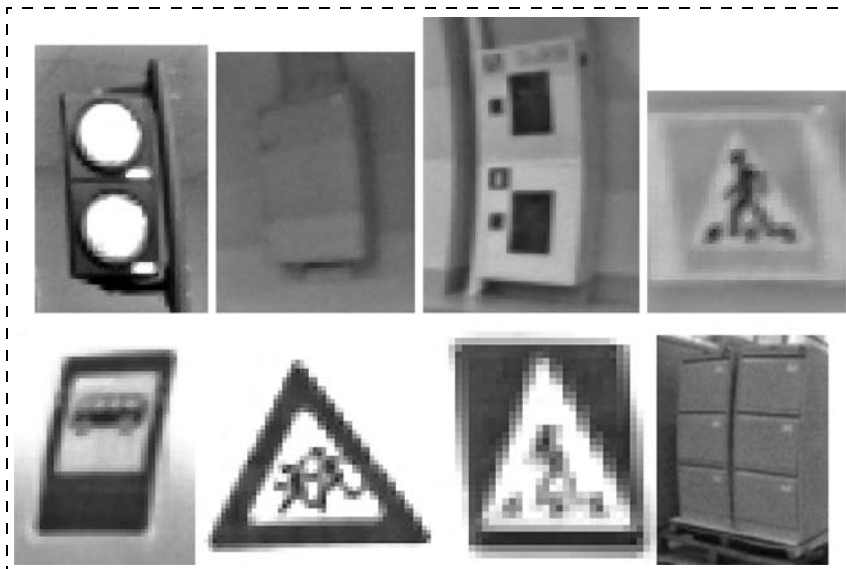


Рис. 6. Примеры изображений визуальных ориентиров от сверхширокоугольной камеры МР

- бильного робота в среде без фиксированных точек отсчета // Экстремальная робототехника. 2015. № 1. С. 351—361.
5. Korsakov A., Fomin I., Gromoshinsky D., Bakhshiev A., Stepanov D., Smirnova E. Determination of an Unmanned Mobile Object Orientation by Natural Landmarks // Supplementary Proceedings of the Fifth International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts. Yekaterinburg, Russia. 2015. Vol. 1710. P. 91—101.
6. Viola P., Jones M. J. Robust Real-Time Face Detection // International Journal of Computer Vision. 2004. Vol. 57. P. 137—154.
7. Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J. Tracking-learning-detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2012. Vol. 34. P. 1409—1422.
8. Shengcai Liao, Xiangxin Zhu, Zhen Lei, Lun Zhang, Stan Z. Li. Learning Multiscale Block Local Binary Patterns for Face Recognition // International conference on Advances in Biometrics. 2007. P. 828—837.
9. Freund Y., Schapire R. E. A Short Introduction to Boosting // International joint conference on Artificial intelligence. 1999. Vol. 2. P. 1401—1406.
10. Girshick R. Fast R-CNN // The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 2015. P. 1440—1448.
11. Fomin I., Gromoshinskii D., Stepanov D. Visual features detection based on deep neural network in autonomous driving tasks // 26 международная конференция "GraphiCon2016". Нижний Новгород, 2016. С. 430—434.
12. Suliman C., Cruceru C., Moldoveanu F. Mobile robot position estimation using the Kalman filter // Scientific Bulletin of the "Petru Maior" University of Targu Mures. 2009. Vol. 6. P. 75.
13. Julier S. J., Uhlmann J. K. Unscented filtering and nonlinear estimation // Proceedings of the IEEE. 2004. Vol. 92, N. 3. P. 401—422.
14. Васильев И. А., Смирнова Е. Ю., Степанов Д. Н. Комплекс интеллектуальной навигации амфибийного спасательного средства // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. № 2 (7). С. 30—33.
15. Stepanov D., Bakhshiev A., Gromoshinskii D., Kirpan N., Gundelakh F. Determination of the Relative Position of Space Vehicles by Detection and Tracking of Natural Visual Features with the Existing TV-Cameras // Analysis of Images, Social Networks and Texts. Springer International Publishing. 2015. Vol. 542. P. 431—442.
16. Степанов Д. Н., Кирпан Н. А., Половко С. А. Алгоритм определения взаимного положения подводных аппаратов с использованием телевизионной системы и специальных световых маркеров // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника — 2016. Матер. Всеросс. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. 2016. С. 427—431.

A Method of Mobile Robot Position Estimation Correction Using Visual Location of Natural Landmarks

D. N. Stepanov, dnstepanov@rtc.ru✉, E. Yu. Smirnova, eus@rtc.ru,
Institute for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia, 194064

Corresponding author: **Stepanov Dmitry N.**, Head of Computer Vision Laboratory,
Institute for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia, 194064
e-mail: dnstepanov@rtc.ru

Accepted on August 07, 2017

The article presents an approach to using of visual location of an arbitrary number of known natural landmarks for correction of position estimation of a mobile robot. The approach is based on using of the Extended Kalman Filter to perform steps of the position prediction and correction based on the visual location. The visual location is performed using a calibrated camera (or a set of cameras) installed on the mobile robot. The task of a mobile robot navigation in a case of poorly determined conditions is often solved using a set of expensive LIDARs. Other sensors like GNSS and odometer often used in mobile robots are usually not precise enough (for example when maneuvering on intersections). The recent research in the field of computer vision allows creation of much less expensive systems based on image analysis from one or several cameras. When used together with other sensors such system can significantly increase the navigation precision and stability. Known visual navigation approaches like visual SLAM and visual odometer are often used but they are often not precise enough especially when the camera movement is mostly rotating. A set of one or more natural visual landmarks can be located automatically in real time using mobile robot cameras. Existing methods provide partial solutions for the position or direction estimation using 3 or more landmarks. The proposed approach is based on using of the Extended Kalman Filter for efficient fusion of the odometer and GNSS data with the visual location of one or more landmarks. Since all the landmarks are used one at a time independently the number of landmarks, cameras, their types and positions are arbitrary. The method is working with one camera and one landmark as well as with a round view camera system with one or many landmarks. Experiments involving autonomous driving through different intersections shown the feasibility of reaching of the accuracy of horizontal position of 10 cm and rotation of 1° and below. The method has been developed for improving of unmanned vehicles navigation at intersections but can be applied to navigation of different ground, space, marine and underwater mobile robots.

Keywords: mobile robot, unmanned ground vehicle, visual navigation, visual location, computer vision, Kalman filter, sensor fusion

For citation:

Stepanov D. N., Smirnova E. Yu. A Method of Mobile Robot Position Estimation Correction Using Visual Location of Natural Landmarks, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 752–758.

DOI: 10.17587/mau.18.752-758

References

1. Chernonozhkin V. A., Polovko S. A. Sistema lokal'noj navigacii dlja nazemnyh mobil'nyh robotov (Local navigation system for terrestrial mobile robots), *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki*, 2008, vol. 57, pp. 13–22 (in Russian).
2. Tjukin A. L., Lebedev I. M., Priorov A. L. Analiz televizionnogo izobrazhenija dlja raboty sistemy pozicionirovanija mobil'nogo robota v pomeschenii po majakam s cvetovoj kodirovkoj (Television image analysis for positioning system of a mobile robot by color coded beacons), *Tezisy nauchno-tehnicheskoi konferencii "Tehnicheskoe zrenie v sistemah upravlenija — 2015"*, Moscow, 2015, pp. 77–78 (in Russian).
3. Raúl Mur-Artal, J. M. M. Montiel and Juan D. Tardós. ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 5, pp. 1147–1163, 2015.
4. Devjaterikov E. A., Mihajlov B. B. Ispol'zovanie dannyh vizual'nogo odometra dlja avtonomnogo vozvrashhenija mobil'nogo robota v srede bez fiksirovannyh toček otscheta (Using of visual odometer data for automatic mobile robot return in environments without fixed landmarks), *Ekstremal'naja Robototekhnika*. 2015, vol. 1, pp. 351–361 (in Russian).
5. Korsakov A., Fomin I., Gromoshinsky D., Bakhshiev A., Stepanov D., Smirnova E. Determination of an Unmanned Mobile Object Orientation by Natural Landmarks, *Supplementary Proceedings of the Fifth International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts*, Yekaterinburg, Russia, 2015, vol. 1710, pp. 91–101.
6. Viola P., Jones M. J. Robust Real-Time Face Detection, *International Journal of Computer Vision*, 2004, vol. 57, pp. 137–154.
7. Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J. Tracking-learning-detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, vol. 34, pp. 1409–1422.
8. Shengcai Liao, Xiangxin Zhu, Zhen Lei, Lun Zhang, Stan Z. Li. Learning Multiscale Block Local Binary Patterns for Face Recognition, *International conference on Advances in Biometrics*, 2007, pp. 828–837.
9. Yoav Freund, Robert E. Schapire. A Short Introduction to Boosting, *International joint conference on Artificial intelligence*, 1999, vol. 2, pp. 1401–1406.
10. Girshick R. Fast R-CNN, *The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2015, pp. 1440–1448.
11. Fomin I., Gromoshinskii D., Stepanov D. Visual features detection based on deep neural network in autonomous driving tasks, *26 international conference GraphiCon2016*, Nizsnii Novgorod, 2016, pp. 430–434.
12. Suliman C., Cruceru C., Moldoveanu F. Mobile robot position estimation using the Kalman filter, *Scientific Bulletin of the "Petru Poni" University of Targu Mures*, 2009, vol. 6, pp. 75.
13. Julier S. J., Uhlmann J. K. Unscented filtering and nonlinear estimation, *Proceedings of the IEEE*, 2004, vol. 92, no. 3, pp. 401–422.
14. Vasil'ev I. A., Smirnova E. Ju., Stepanov D. N. Kompleks intellektual'noj navigacii amfibijnogo spasatel'nogo sredstva (Intelligent navigation complex for amphibian rescue vehicle), *Robototekhnika i tehnicheskaja kibernetika*, 2015, vol. 2 (7), pp. 30–33 (in Russian).
15. Stepanov D., Bakhshiev A., Gromoshinskii D., Kirpan N., Gundelakh F. Determination of the Relative Position of Space Vehicles by Detection and Tracking of Natural Visual Features with the Existing TV-Cameras, *Analysis of Images, Social Networks and Texts*, Springer International Publishing, 2015, vol. 542, pp. 431–442.
16. Stepanov D. N., Kirpan' N. A., Polovko S. A. Algoritm opredelenija vzaimnogo polozhenija podvodnyh apparatov s ispol'zovaniem televizionnoj sistemy i special'nyh svetovyh markerov (Algorithm for determining the relative position of underwater vehicles using a television system and special light markers), *Intellektual'nye sistemy, upravlenie i mehatronika — 2016 materialy Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoi konferencii molodyh uchenykh, aspirantov i studentov*. 2016, pp. 427–431 (in Russian).

В. П. Андреев, д-р техн. наук, проф., стар. науч. сотр., andreevipa@yandex.ru,

В. Э. Тарасова, студент (магистрант), viku.ne2@gmail.com,

ФГБОУ ВО Московский государственный технический университет "СТАНКИН", МЛ "Сенсорика",

Международный Институт новых образовательных технологий

(ФГБОУ ВО "Российский государственный гуманитарный университет"), г. Москва

Определение формы препятствий мобильным роботом с помощью сканирующих угловых перемещений ультразвукового датчика¹

Приведены результаты исследования использования ультразвукового датчика в сенсорной системе мобильного робота для определения формы препятствия. В работе предлагается определить возможность алгоритмического анализа данных от установленного ультразвукового датчика на управляемом от ЭВМ сканирующем устройстве. Целью является определение формы препятствия — внешнего угла, внутреннего угла, плоской стены, дверного проема с открытой дверью и т. п., и их ориентацию в некоторой системе координат.

Ключевые слова: мобильный робот, сенсорная система, ультразвуковой датчик, информационно-измерительная и управляющая система

Введение

Ультразвуковые (УЗ) датчики широко используются в сенсорных системах мобильных роботов (МР), например, в роботе-гуманоиде REEM (рис. 1, см. третью сторону обложки) компании PAL Robotics [1]. Робот используется в качестве экскурсовода, конференсье или "работника", выполняющего различного рода задания. Робот имеет автономную систему навигации, сочетающую УЗ и лазерные датчики, предотвращающие его столкновение с людьми и различными предметами. В роботе ROBOSEM (рис. 2, см. третью сторону обложки) компании Yujin Robot [2], выполняющем функции учителя английского языка в начальных школах, также для обнаружения препятствий используется сочетание УЗ и лазерного датчиков.

УЗ датчик имеет широкую апертуру луча, т. е. большой угол измерения ($\sim 30^\circ$). Поэтому такой датчик позволяет лишь обнаружить препятствие и определить некоторое расстояние до него. Поскольку неизвестно, от какой точки препятствия получено "эхо", то неизвестно, до какой части препятствия измерено это расстояние. В случае нескольких объектов, перекрывающих зону "видимости" датчика (рис. 3), расстояние может быть определено как до объекта 1, находящегося перед датчиком (например, точка 2), так и до ближайшей точки объекта 2 (точка 1).

Из-за низкой разрешающей способности датчика по пространству отсутствует возможность определять форму препятствия, возникающего на пути движения МР. Например, при перемещениях робота в пространстве жилых или служебных помещений было бы желательно идентифицировать препятствия типа "углы, образованные стенами" (внутренние или внешние), или "дверные проемы" (с открытыми или закрытыми дверями).

¹ Работа выполняется при частичной поддержке РФФИ: гранты 16-07-00811а, 16-07-00935а и 16-07-01264а.

Гипотеза исследования: использование сканирующих угловых перемещений УЗ датчика позволит повысить его разрешающую способность, достаточную для определения формы препятствия.

Цель исследования: исследовать возможность использования сканирующих угловых перемещений УЗ датчика для определения формы препятствий в целях организации движения мобильного робота в недетерминированной среде.

Задачи исследования:

1. Разработать и изготовить лабораторный макет управляемого от микроконтроллера и ЭВМ поворотно-наклонного устройства с закрепленным на нем УЗ датчиком.

2. Исследовать возможность использования сканирующих угловых перемещений ультразвукового датчика для повышения его разрешающей способности с помощью изготовленного лабораторного макета и определить параметры сканирующего движения.

3. Предложить алгоритм, позволяющий по показаниям сканирующего УЗ датчика определять форму препятствия.

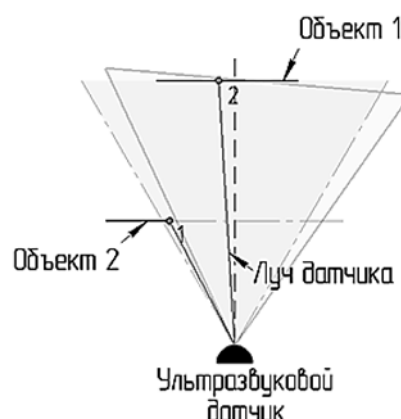


Рис. 3. Измерение УЗ датчиком

Поворотно-наклонный механизм для организации сканирующих движений УЗ датчика

При повороте датчика происходит смещение области видимости, вследствие чего точка 1 (рис. 3) выходит из зоны апертуры луча, и ближайшей точкой становится точка 2. Вычисляя разность между измеренными расстояниями, можно получить представление о форме препятствия. В работе [3] используется поворот датчика за счет поворота самого МР. Данный метод энергозатратен и обладает низкой точностью (по углу поворота). Предлагается для совершенства поворота УЗ датчика в горизонтальной плоскости и наклона датчика в вертикальной плоскости использовать механизм, приведенный на рис. 4 (см. третью сторону обложки).

Механизм состоит из следующих элементов: 1 — сервопривод FS5106B; 2 — поворотный стол; 3 — сервопривод SG90 9G; 4 — уголок; 5 — УЗ датчик HC-SR04; кроме того, на рисунке обозначено: α — азимут, угол между осью OX и направлением на цель; θ — тангаж, угол между осью OY и направлением на цель.

Информационный выход УЗ датчика подключен к микроконтроллеру Arduino Uno, с помощью которого длительность формируемого УЗ датчиком импульса преобразуется в дальность, измеряемую в сантиметрах. Сервоприводы управляются от того же микроконтроллера. Микроконтроллер, в свою очередь, подключен к компьютеру посредством шины USB. Соответствующее программное обеспечение позволяет управлять сервоприводами, которые соответствующим образом изменяют ориентацию УЗ датчика в пространстве с точностью до 1° .

Компьютер подает на микроконтроллер сигнал, задающий угол α поворота вала сервопривода (1), изменяющийся дискретно с шагом $\Delta\varphi_1$ (шаг сканирования по горизонтали). После каждого поворота запускается ультразвуковой датчик и выполняется измерение расстояния до объекта, расположенного перед датчиком. В результате формируется строка со значениями измеренных расстояний, соответствующи-

щих углу поворота α от $-\alpha_{\max}$ до $\alpha_{\max}$ в горизонтальной плоскости: $d = f(\alpha)$. Там, где $\Delta d = |d_i - d_{i+1}| > T$, где T — некоторый порог, считаем, что объект заканчивается. Таким образом можно определить ширину находящегося перед нами объекта и угол наклона объекта к оси OX устройства.

Там, где по нашим расчетам находится середина обнаруженного объекта, выполняем сканирование по вертикали аналогично горизонтали. Компьютер подает сигнал, задающий угол θ поворота вала сервопривода (2, рис. 4), изменяющийся дискретно с шагом $\Delta\varphi_2$ (шаг сканирования по вертикали). В результате формируется столбец со значениями расстояний, соответствующих углу поворота θ от $-\theta_{\max}$ до $\theta_{\max}$ в вертикальной плоскости: $d = f(\theta)$. Таким образом можно определить высоту находящегося перед нами объекта и угол наклона объекта к оси OY устройства.

Исследование возможности использования сканирующих угловых перемещений УЗ датчика для определения формы препятствий

В данной части работы приведены результаты экспериментов, выполненных для сканирования в горизонтальной плоскости.

▲ Идентификация вертикального плоского препятствия, ориентированного под углом к датчику

Сканирование проводится слева направо (рис. 5). Объект находится на расстоянии $d = 20$ см, угол сканирования $\alpha_{\max} = \pm 30^\circ$ с шагом $\Delta\varphi_1 = 3^\circ$. Результаты приведены в табл. 1.

Алгоритм:

1) исключаем аномальные значения замеров [4] (например, точки, дающие резкий перепад дальности с соседними, $\Delta D_{\text{дат}} > T$, где T — заданный порог), в результате остаются только точки, соответствующие объекту;

2) проводим аппроксимацию точек, используя метод наименьших квадратов [5], и определяем угол ориентации ψ плоскости объекта по отношению к роботу (рис. 5).

Таблица 1

Показания УЗ датчика $D_{\text{дат}}$ при различных углах поворота

$\alpha, ^\circ$	-30	-27	-24	-21	-18	-15	-12	-9	-6	-3	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$D_{\text{дат}}, \text{см}$	54	28	26	25	24	25	24	25	23	21	21	18	18	16	16	15	56	78	77	85	70

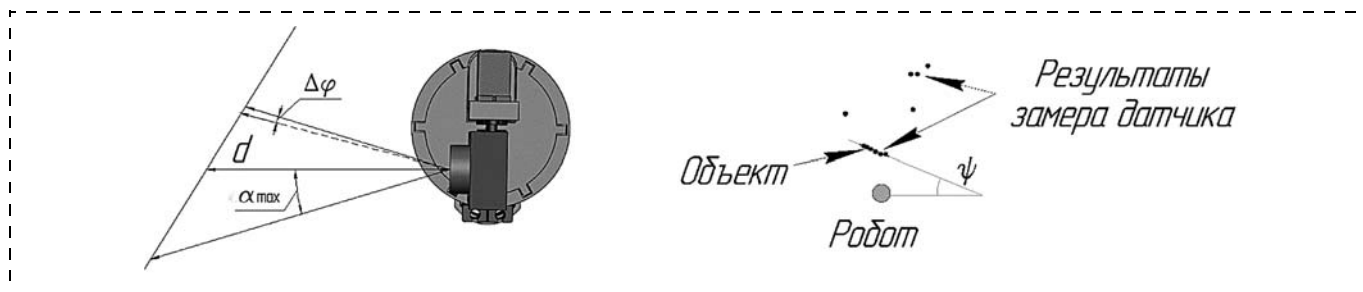


Рис. 5. Схема сканирования плоского препятствия и результаты замера дальности (черные метки)

Показания УЗ датчика $D_{\text{дат}}$ при различных углах поворота

$\alpha, ^\circ$	-30	-27	-24	-21	-18	-15	-12	-9	-6	-3	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$D_{\text{дат}}, \text{см}$	19	18	16	17	17	0	15	14	10	14	15	15	16	17	18	18	54	36	54	55	53

Таблица 3

Показания УЗ датчика $D_{\text{дат}}$ при различных углах поворота

$\alpha, ^\circ$	-30	-27	-24	-21	-18	-15	-12	-9	-6	-3	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$D_{\text{дат}}, \text{см}$	10	0	10	11	11	12	12	13	13	13	13	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

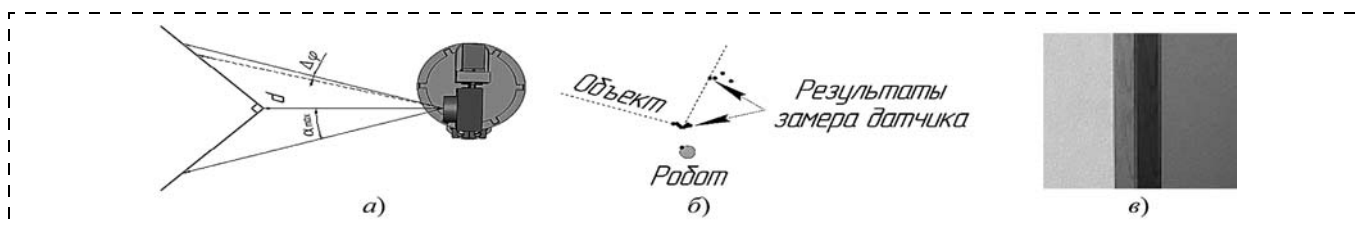


Рис. 6. Схема сканирования внешнего угла (а), результаты замеров — черные метки (б) и фото объекта (в)

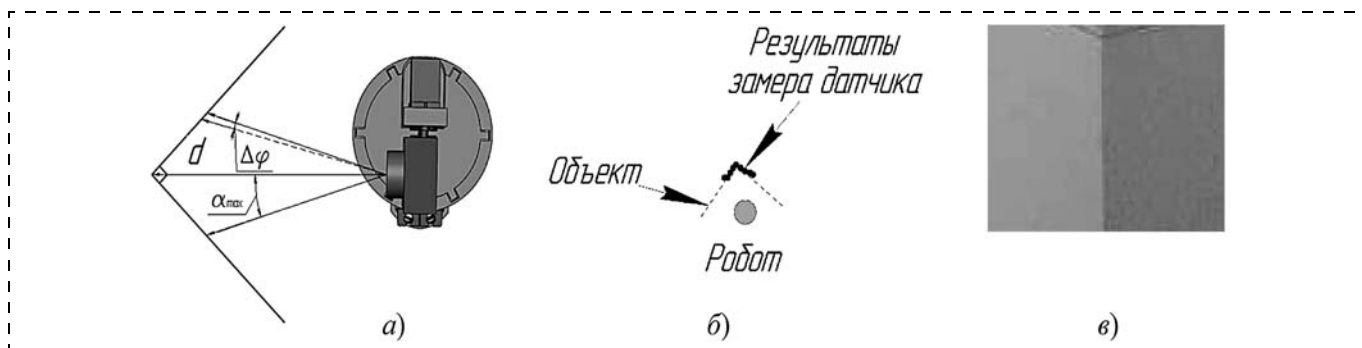


Рис. 7. Схема сканирования внутреннего угла (а), результаты замеров — черные метки (б) и фото объекта (в)

Действие робота: робот может повернуться на данный угол и двигаться параллельно препятствию.

▲ Идентификация внешних (выпуклых) углов

Сканирование проводится слева направо (рис. 6). Объект находится на расстоянии $d = 10$ см, угол сканирования $\alpha_{\text{max}} = \pm 30^\circ$ с шагом $\Delta\varphi_1 = 3^\circ$. Результаты приведены в табл. 2.

Исключив точки, соответствующие аномальным значениям, получаем следующую строку:

19	18	16	17	17	15	14	10	14	15	15	16	17	18	18
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Сканирование выполняется слева направо:

1) сначала происходит уменьшение значений дальности $D_{\text{дат}}$ (19, 18, 16, 17, 17, 0, 15, 14, 10) — это первая сторона угла;

2) затем происходит последовательное увеличение значений дальности $D_{\text{дат}}$ (10, 14, 15, 15, 16, 17, 18);

3) результат анализа: уменьшение, затем увеличение значений, следовательно, это выпуклый угол.

▲ Идентификация внутренних (вогнутых) углов

Сканирование проводится слева направо (рис. 7). Объект находится на расстоянии $d = 10$ см, угол сканирования $\alpha_{\text{max}} = \pm 30^\circ$ с шагом $\Delta\varphi_1 = 3^\circ$. Результаты приведены в табл. 3.

Выполнив анализ подобно описанному выше, приходим к заключению, что перед нами вогнутый угол (увеличение, затем уменьшение значений).

▲ Идентификация "дверных проемов"

Сканирование проводится при полностью открытой двери и при не полностью открытой двери (рис. 8). Результаты замеров (черные метки): объ-

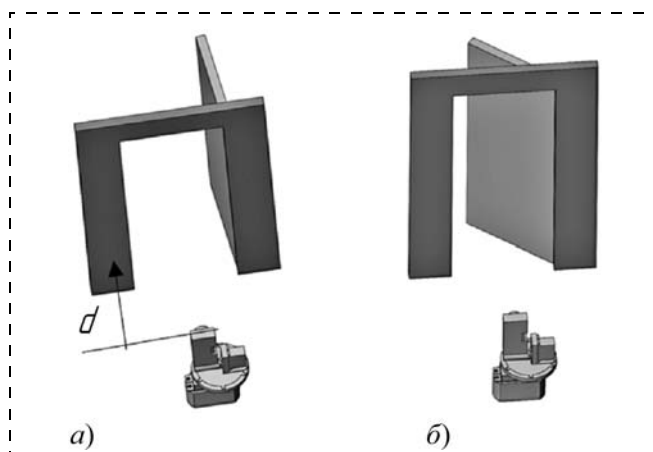


Рис. 8. Схема сканирования открытых дверей: полностью открытая дверь (а); приоткрытая дверь (б)

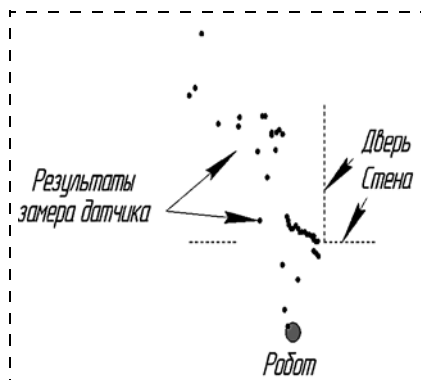


Рис. 9. Открытая дверь, $d_1 = 30$ см

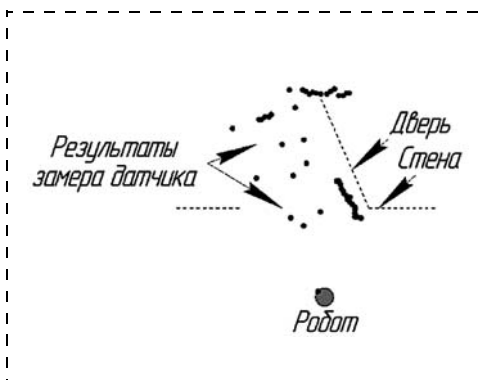


Рис. 10. Приоткрытая дверь, $d_1 = 30$ см

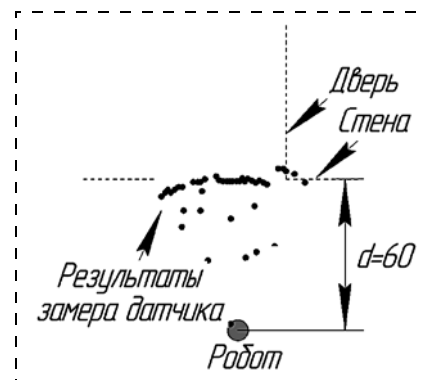


Рис. 11. Расстояние $d_2 = 60$ см

ект находится на расстоянии $d_1 = 30$ см (рис. 9 и рис. 10); $d_2 = 60$ см (рис. 11), угол сканирования $\alpha_{\max} = \pm 30^\circ$ с шагом $\Delta\varphi_1 = 1^\circ$.

Робот, находясь на расстояниях более 50 см от дверного проема, ширина которого $d_2 = 60$ см, дверной проем не обнаруживает (рис. 11).

Заключение

Использование сканирующих угловых перемещений УЗ датчика позволяет определять форму препятствия типа "внешний угол", "внутренний угол", "плоская стена", "дверной проем с открытой дверью" и т. п., и их ориентацию в некоторой системе координат.

УЗ датчики предполагается в дальнейшем использовать в сенсорной системе гетерогенного модульного мобильного робота [6].

Список литературы

1. Гуманоидный робот REEM-C. URL: <https://robo-hunter.com/resume/gumanoidnii-robot-reem-c> (дата обращения: 29.05.2017).
2. Робот ROBOSEM учит корейских детишек английскому. URL: http://www.prorobot.ru/07/robot_robosem.php. — Загл. с экрана (дата обращения: 29.05.2017).
3. Ташев А. А. Разработка робота на основе ультразвукового дальномера. URL: http://oreluniver.ru/file/chair/aplast/nol/Tashev_Fedorov.pdf. (дата обращения: 29.05.2017).
4. Касандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. М.: Наука, 1970.
5. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М.: Физматлит, 1962.
6. Андреев В. П., Ким В. Л., Подураев Ю. В. Сетевые решения в архитектуре гетерогенных модульных мобильных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. № 3 (12). С. 23—29.

Determination of the Form of Obstacles by a Mobile Robot Using Scanning Angular Movements of Ultrasonic Sensor

V. P. Andreev, andreevipa@yandex.ru, V. E. Tarasova, andreevipa@yandex.ru✉, MSTU "STANKIN", International Laboratory "Sensorika", International Institute of the New Educational Technologies, RSUH, Moscow

Corresponding author: Tarasova Victoria E., student, MSTU "STANKIN", International Laboratory "Sensorika", International Institute of the New Educational Technologies, RSUH, Moscow, Russian Federation e-mail: andreevipa@yandex.ru

Accepted on August 07, 2017

The article contains results of research on the possibility of using an ultrasonic sensor in the sensor system of a mobile robot to determine the shape of the obstacle. The ultrasonic sensor has a wide beam aperture, i.e. large measuring angle (measuring angle $\sim 30^\circ$). Therefore, such a sensor allows only detecting an obstacle and determining a certain distance to him. But it is not known from which obstacle point the "echo" is received and it is not known to what part of the obstacle this distance is measured. The sensor cannot determine the shape of the obstacle because of low space resolution. For example, when a robot moves in a residential or office rooms, it would be desirable to identify obstacles such as "corners formed by walls" (internal or external) or "doorways" (with doors open or closed). A hypothesis was proposed that the use of scanning angular movements of the ultrasonic sensor will increase its resolution, required to determine the shape of the obstacle. The pivot-tilt mechanism was developed and assembled. The ultrasonic sensor attached on this computer-controlled mechanism and by algorithmic analysis of the data coming from the sensor during the scanning process, the form of the obstacle was recognized. Was found that using of algorithmic analysis is possible to determine the shapes of flat object, such as: "flat wall", "outer corner", "inner corner", "door opening with an open door", etc. This mechanism is expected to be used in the sensor system of a heterogeneous modular mobile robot.

Keywords: mobile robot, sensor system, ultrasonic sensor, information-measuring and control system

Acknowledgements: the work is carried out with the partial support of the RFFI: grants 16-07-00811a, 16-07-00935a and 16-07-01264a.

For citation:

Andreev V. P., Tarasova V. E. Determination of the Form of Obstacles by a Mobile Robot Using Scanning Angular Movements of Ultrasonic Sensor, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 759–763.

DOI: 10.17587/mau.18.759-763

References

1. **The humanoid** robot REEM-C, available at: <https://robot-hunter.com/resume/gumanoidnii-robot-reem-c>. — Ver. from the screen (date of circulation: 29/05/2017) (in Russian).

2. **Robot ROBOSEM** teaches Korean kids English, available at: http://www.prorobot.ru/07/robot_robossem.php. Ver. from the screen (date of access: 29/05/2017) (in Russian).

3. **Tashev A. A.** *Razrabotka robota na osnove ultrazvukovogo dальномера* (The development of a robot based on an ultrasonic rangefinder), available at: http://oreluniver.ru/file/chair/aplast/nol/Tashev_Fedorov.pdf (date of access: 29/05/2017) (in Russian).

4. **Kasandrova O. N., Lebedev V. V.** *Obrabotka rezultatov nabludenii* (Observation of results), Moscow, Nauka, 1970.

5. **Linnik U. V.** *Metod naimenshih kvadratsov i osnovi matematiko-statisticheskoi teorii obrabotki nabludenii* (Ordinary Least Squares and the fundamentals of the mathematical and statistical theory of observation processing), Moscow, Fizmatlit, 1962 (in Russian).

6. **Andreev V. P., Kim V. L., Poduraev Yu. V.** *Setevii reshenia v architecture geterogennih modulnih robotov* (Network solutions in the architecture of heterogeneous modular mobile robots), *Robotics and technical cybernetics*, 2016, no. 3 (12), pp. 23–29 (in Russian).

УДК 621.865.8

DOI: 10.17587/mau.18.763-766

Н. А. Рудянов, д-р техн. наук, доц., нач. отдела, rudianov_1980@mail.ru,

В. С. Хрущев, канд. техн. наук, доц., вед. науч. сотр., wasserX@yandex.ru,

ФГБУ "3 Центральный научно-исследовательский институт" МО РФ, г. Москва

Организация приобретения и формализации знаний интеллектуальных систем перспективных автономных робототехнических комплексов военного назначения в ходе опытно-войсковой эксплуатации дистанционно управляемых комплексов

Рассматриваются вопросы приобретения знаний для построения интеллектуальных систем управления вооружением автономных наземных роботов. Предлагается такой этап жизненного цикла, как опытно-войсковая эксплуатация робототехнических комплексов военного назначения, использовать для определения облика и формирования интеллектуальных систем принятия решений, приобретения и формализации знаний о типовых задачах функционирования, перечне, характеристиках и признаках типовых целей, последовательности действий, перечне возникающих альтернатив при принятии решений в ходе боевой работы и правилах их выбора.

Ключевые слова: робототехнические комплексы военного назначения, интеллектуальные системы управления вооружением, автономное управление, групповое применение

В работе [1] показано, что в случае, когда робототехнический комплекс (РТК) оснащается вооружением ближнего боя, его применение в режиме дистанционного управления становится нерациональным, так как эффективное функционирование робота требует участия нескольких операторов, обеспечивающих движение робота, разведку обстановки, поиск и выбор цели, обстрел и оценку результатов стрельбы, принятие тактических решений. Дистанционно управляемые РТК имеют ряд принципиальных недостатков и ограничений: повышенные требования к каналу связи, ограниченный радиус действия, демаскировка объекта и пункта управления, а также возможность применения средств радиоэлектронного и огневого противодействия вследствие интенсивного радиообмена.

Применение различных методов повышения эффективности дистанционного управления имеет смысл для решения специальных задач или задач обеспечения при одиночном применении РТК. При массовом использовании в боевых действиях групп разнородных комплексов дистанционное управление как основной способ управления РТК будет непереносимо.

Практически все усилия по повышению уровня автономности РТК в настоящее время связаны с автономным движением, а движение является лишь одним из этапов процесса боевой работы. Обеспечение автономности функционирования роботов и их групп, находящихся на значительном удалении от центра управления, при выполнении ими задач по назначению связано прежде всего с разработкой интеллектуальных систем управления вооружением боевых роботов, включая все основные фазы боевой работы: поиск и обнаружение целей, оценка их важности (опасности), выбор цели для обстрела, выбор оружия и методов стрельбы, наведение оружия, стрельба, оценка результатов стрельбы и перенос огня.

Существует целый ряд методов решения задач, составляющих основу интеллектуальных систем управления, основанных на приобретении и формализации знаний. Выбор метода решения конкретных задач зависит от многих факторов [2].

Во-первых, должно быть достигнуто соответствие метода принятия решений характеристикам задачи:

- определенность (относительно каждой альтернативы известно, что она неизменно приводит к

некоторому конкретному исходу — все функциональные зависимости детерминированы);

- неопределенность в смысле случайности (каждая альтернатива приводит к одному из множеств возможных исходов, но каждый исход имеет известную или приписываемую вероятность появления);
- неопределенность в виде нечеткости (вероятности исходов неизвестны, тем не менее известны все альтернативы и множество возможных исходов, а также возможно задать предпочтение на этом множестве);
- тип множества альтернатив (дискретное или непрерывное);
- число критериев;
- тип постановки задачи и др.

Во-вторых, существенное влияние на выбор метода оказывают характеристики экспертов: их возможности, квалификация, способности, связанные с использованием субъективных критериев, временных ограничений, возможностью давать качественные и количественные оценки.

В-третьих, на выбор метода оказывает влияние представление экспертов о последствиях принятия решения и возможность последующего обоснования использования метода, степень "доверия" ему, предшествующий опыт использования метода.

В зависимости от перечисленных факторов могут применяться различные методы объединения информации: байесовская логика, нечеткая логика, коэффициенты уверенности и др.

В 80...90-х годах прошлого века интенсивно проводили исследования по работке систем принятия решений реального времени. Но в тот момент результаты этих исследований оказались не востребованными в связи с резким сокращением НИОКР в области вооружения и военной техники и неготовности на тот момент технологий робототехники к обеспечению автономного функционирования. Частично эти результаты были внедрены в системы поддержки авиационных комплексов, но в наземной технике они не используются. При этом существующие методы автоматизации процессов принятия решений в ходе боевой работы, которые являются основным содержанием систем управления вооружением РТК, в принципе, позволяют создавать автономные интеллектуальные системы. Основные сложности возникают при приобретении знаний — процессе получения знаний от эксперта или каких-либо других источников — и при передаче их интеллектуальной системе, эффективность которой целиком и полностью зависит от качества извлеченных знаний и правильности их представления.

Несмотря на многочисленные попытки автоматизировать процессы приобретения знаний, в настоящее время и в обозримом будущем реально следующая модель приобретения знаний: эксперт с помощью инженера по знаниям решает задачи определения необходимости модификации или расширения знаний и извлечения новых знаний о предметной области. Преобразованием знаний в форму, понятную интеллектуальной системе, занимается инженер по знаниям [3]. Модификацию знаний

проводит сама интеллектуальная система, пользуясь встроенными возможностями. Таким образом, роль экспертов как носителей знаний не снижается.

При создании интеллектуальных систем управления вооружением в процессе роботизации существующего вооружения в качестве источников знаний выступают: члены боевых расчетов комплексов, преподаватели учебных центров и военных училищ, инструкции по эксплуатации, учебники, правила стрельбы, уставы и т. п. Создание автоматических устройств на основе интеллектуальных систем управления является задачей сложной, но реальной.

Иное дело в случае применения интеллектуальных систем управления вооружением автономных роботов, создаваемых изначально как безэкипажные. Как правило, они будут обладать комплексированной системой технического зрения, развитой информационной системой на основе датчиков различной физической природы, при отсутствии подсистемы индикации и представления информации. Состав оборудования и вооружения может существенно отличаться от обитаемых комплексов-прототипов, если таковые вообще будут существовать, а опыта управления, как правило, нет.

Процесс приобретения знаний для построения интеллектуальной системы управления вооружением сталкивается с существенными сложностями — отсутствием экспертов, обладающих опытом принятия решений для конкретного образца вооружения, инструкций в части их боевого применения и других источников знаний о предметной области. Фактически обучать необходимо не только системы принятия решений, но и собственно учителей — экспертов. Это требует создания развитой модели внешней среды, включая противодействующего противника, описания множества боевых ситуаций и правил использования имеющегося оборудования и вооружения, алгоритмов поведения робота.

В то же время по существующим правилам принятию РТК военного назначения на снабжение предшествует этап опытно-войсковой эксплуатации (ОВЭ). Целями ОВЭ РТК являются:

- определение возможности и особенностей использования образцов РТК в бою общевойсковыми формированиями тактического звена для мотострелковых, парашютно-десантных и разведывательных подразделений;
- первоначальное освоение РТК с оценкой его тактико-технических, эксплуатационных и боевых характеристик в дневных и ночных эксплуатационных условиях;
- отработка методики боевого применения РТК;
- оценка эффективности РТК;
- проверка работоспособности РТК и соответствия функциональности РТК требованиям технического задания;
- фиксация сбоев, ошибок, недостатков, возникающих и выявленных в ходе ОВЭ;
- выдача рекомендаций о возможности принятия РТК на снабжение и целесообразности их промышленного производства.

Задачи, решаемые в ходе ОВЭ:

- оценка возможности обучения расчетов РТК из состава военнослужащих, проходящих военную службу по контракту;
- определение возможности и особенностей применения подразделений, оснащенных РТК, в общевойсковом бою мотострелковых, парашютно-десантных и разведывательных подразделений типа "отделение-взвод-рота-батальон";
- оценка боевых и эксплуатационных возможностей образцов и подразделений, оснащенных РТК, в различных видах боя и различных условиях эксплуатации;
- оперативное устранение причин сбоев, ошибок, недостатков, возникающих в процессе ОВЭ;
- внесение изменений в техническую и эксплуатационную документацию по итогам ОВЭ;
- разработка методических рекомендаций по боевому применению РТК.

Таким образом, объем, привлекаемые средства и сроки (до года) ОВЭ РТК военного назначения позволяют говорить о возможности в ходе нее формализации знаний о типовых задачах функционирования, перечне, характеристиках и признаках типовых целей, последовательности действий, перечне возникающих альтернатив при принятии решений в ходе боевой работы и правилах их выбора и т. п.

Представляется целесообразным использовать этот период жизненного цикла для определения облика и формирования интеллектуальных систем принятия решений РТК военного назначения.

Для этого необходимо привлечение инженеров по знаниям во время всего цикла ОВЭ для формирования опросных листов по различным разделам этапа боевой работы в целях определения:

- типовых ситуаций применения РТК и их признаков;
- признаков целей для решения задач выбора;

- признаков ситуаций, требующих применения целевого оборудования, правила выбора той или иной целевой нагрузки;
- перечня и характеристик признаков успешности применения целевого оборудования;
- правил перехода к следующим этапам боевой работы и т. д.

Этот перечень зависит от конкретного типа РТК и его назначения. Члены боевых расчетов в ходе ОВЭ, осваивая технику и опытным путем формируя правила ее боевого применения, одновременно будут участвовать в их формализации для последующей автоматизации процессов принятия решений и формирования интеллектуальных систем РТК военного назначения.

Выводы. В настоящее время отсутствуют специалисты по боевой работе и применению РТК военного назначения, как и вербализованные знания в этой области в виде учебников, инструкций, правил боевого применения. Организация в ходе ОВЭ робототехнических комплексов приобретения и формализации знаний членов боевых расчетов и командиров подразделений одновременно с их обучением работе на не имеющей аналогов технике должна значительно сократить время разработки интеллектуальных систем принятия решений автономных РТК военного назначения.

Список литературы

1. Шеремет И. Б., Рудянов Н. А., Рябов А. В., Хрущев В. С. О необходимости разработки концепции построения и применения автономных робототехнических комплексов военного назначения // Экстремальная робототехника. Тр. Междунар. науч.-техн. конф. Санкт-Петербург, 2016. С. 35—39.
2. Искусственный интеллект. Кн. 2. Модели и методы: Справочник / Под ред. Д. А. Поспелова М.: Радио и связь, 1990. 304 с.
3. Кокорева Л. В., Перевозчикова О. Л., Ющенко К. Л. Диалоговые системы и представление знаний. Киев: Наук. Думка, 1992. 448 с.

Organization of the Acquisition and Formalization of Knowledge of Intelligent Systems of Prospective Autonomous Military RTCs in the Course of Pilot Operation of Remote-Controlled Complexes

N. A. Rudianov, rudianov_1980@mail.ru✉, **V. S. Khrushchev**, wasserX@yandex.ru,
Federal State Budgetary Institution "3 Central Research Institute"
of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, 107564, Russian Federation

Corresponding author: **Rudianov Nikolay A.**, Ph. D., Head of Department
Federal State Budgetary Institution "3 Central Research Institute"
of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, 107564, Russian Federation,
e-mail: rudianov_1980@mail.ru

Accepted on August 11, 2017

In the article, based on the analysis of the world experience in the application of remotely-controlled robotic systems, it is concluded that the mass application of irrationality in the course of a prospective combined arms battle is irrational. The main disadvantages of classical remote control in combat conditions are increased requirements for the communication channel, limited range, unmasking of the object and control point, as well as the possibility of using radio electronic and fire countermeasures due to intensive radio exchange. It is shown that the real increase in the efficiency of the use of robotic complexes for military purposes is possible when they are used as part of groups, but they must have elements of autonomy and the ability to solve intellectual problems. Ensuring the autonomy of the functioning of robots and their groups located at a considerable distance from the control center, when performing tasks for their intended purpose, is primarily related to the development of intelligent combat weapon control systems for combat robots, including all the main phases of combat operations. The issues of acquiring knowledge for the construction of intelligent weapon control systems for autonomous terrestrial robots are considered. This phase of the life cycle is proposed, such

as the pilot operation of robotic complexes for military purposes, used to determine the appearance and formation of intellectual decision-making systems, the acquisition in the course of it of formalization of knowledge about typical tasks of operation, a list, characteristics and attributes of typical goals, sequence of actions, list emerging alternatives in making decisions in the course of combat operations and the rules for their selection. It is proposed to involve engineers in knowledge during the whole cycle of pilot operation to form the rules of combat use of robotic complexes by experience, to formalize the knowledge gained for subsequent automation of decision-making processes and the formation of intellectual systems for military-type military hardware.

Keywords: robotic complexes for military use, intelligent weapons control systems, autonomous control, group application

For citation:

Rudianov N. A., Khrushchev V. S. Organization of the Acquisition and Formalization of Knowledge of Intelligent Systems of Prospective Autonomous Military RTCs in the Course of Pilot Operation of Remote-Controlled Complexes, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 763–766.

DOI: 10.17587/mau.18.763-766

References

1. **Sheremet I. B., Rudianov N. A., Ryabov A. V., Khrushchev V. S.** *O neobkhodimosti razrabotki kontseptsii postroeniya i primeneniya av-*

tomnykh robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya (On the need to develop a concept for the construction and application of autonomous robotic complexes for military use), *Extreme Robotics. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*, St. Petersburg, 2016, pp. 35–39 (in Russian).

2. **Pospelova D. A.** *Iskusstvennyi intellekt. Kn. 2. Modeli i metody: Spravochnik* (Artificial Intelligence. In 3 books. Book. 2. Models and methods: Handbook), Moscow, Radio and Communication, 1990, 304 p. (in Russian).

3. **Kokoreva L. V., Perevozchikova O. L., Yushchenko K. L.** *Dialogovye sistemy i predstavlenie znanii* (Dialogue systems and knowledge representation), Kiev, Science. Dumka, 1992, 448 p. (in Russian).



28–30 мая 2018 г. в Санкт-Петербурге
на базе ГНЦ РФ АО "Концерн "ЦНИИ Электронприбор"
состоится



Юбилейная XXV Санкт-Петербургская Международная конференция ПО ИНТЕГРИРОВАННЫМ НАВИГАЦИОННЫМ СИСТЕМАМ (МКИНС 2018)

Председатель программного комитета — Академик РАН, проф. **В. Г. Пешехонов**

Тематика конференции

- ◆ Инерциальные датчики, системы навигации и ориентации
- ◆ Интегрированные системы навигации и управления движением
- ◆ Глобальные навигационные спутниковые системы
- ◆ Средства гравиметрической поддержки навигации

В рамках каждого направления рассматриваются:

схемы построения и конструктивные особенности; методы и алгоритмы; особенности разработки и применения для различных подвижных объектов и условий движения (аэрокосмические, морские, наземные, подземные); испытания и метрология.

ВАЖНЫЕ ДАТЫ

1 ноября 2017 г. — срок подачи рефератов в Оргкомитет для рецензирования.

1 февраля 2018 г. — размещение на сайте списка принятых докладов

24 февраля 2018 г. — размещение на сайте предварительного варианта программы

15 марта 2018 г. — срок подачи докладов, включенных в программу конференции и подготовленных по правилам IEEE Xplore.

С 1 февраля 2018 г. до 19 апреля 2018 г. — **ONLINE**-регистрация участников конференции

Выбранные Программным комитетом доклады после доработки авторами будут рекомендованы для публикации в виде статьи в журнале "Гироскопия и навигация" (включен в перечень ВАК и индексируется в РИНЦ) и его англоязычной версии Gyroscopy and Navigation (индексируется в Scopus).

Подробную информацию о конференции см. [сайте](http://www.elektropribor.spb.ru/icins2017/rindex):

<http://www.elektropribor.spb.ru/icins2017/rindex>



А. Е. Глазырин, аспирант, glazyrin.andre@mail.ru,

И. В. Петухов, д-р техн. наук, проф., PetuhovIV@volgatech.net,

Л. А. Стешина, канд. техн. наук, доц., SteshinaLA@volgatech.net,

Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола

Тренажеры виртуальной реальности: проблемы и перспективы использования в качестве средств подготовки оперативного персонала¹

Представлен обзор современных подходов к использованию средств виртуальной реальности в качестве средств подготовки оперативного персонала эргатических систем. Отдельные акценты сделаны на проблемах использования средств виртуальной и дополненной реальности, связанных с вероятностным когнитивным диссонансом, возникающим при управлении реальными физическими объектами. Обозначены перспективы использования средств виртуальной реальности в профессиональной подготовке.

Ключевые слова: виртуальная реальность, дополненная реальность, тренажер, симулятор, человек-оператор, эргатические системы

Введение

Несмотря на значительные успехи автоматизации и интеллектуализации, значительная часть современных сложных технических объектов включает в контур управления человека-оператора и относится к классу эргатических систем (ЭС). Повышение требований к информационной и технической составляющим ЭС приводит к естественному повышению требований и к самому человеку-оператору: его надежности, производительности, стабильности его параметров и т. д.

Повышение требований к качеству работы оператора обусловлено увеличением числа объектов управления, изменением условий труда, ростом скорости и сложности производственных процессов и т.п. В результате значительно увеличивается срок подготовки операторов, меняются методические принципы профессиональной подготовки, внедряются новые технические средства подготовки.

Очевидно, что квалификация оператора напрямую зависит от качества его подготовки [1]. Также от уровня подготовки оператора напрямую зависит эффективность его деятельности, в том числе производительность [2], безопасность [3], сохранность технологического оборудования [4].

В связи с этим возникает задача повышения эффективности подготовки операторов ЭС, которая может быть решена, в частности, за счет использования современных средств виртуализации, интеллектуализации и информатизации.

¹ Результаты исследования получены при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ № 25.1095.2017/4.6.

В данной статье представлен обзор современных подходов к использованию средств виртуальной реальности (ВР) и дополненной реальности (ДР) для профессиональной подготовки операторов ЭС.

Принципы взаимодействия объектов и субъектов в ЭС

Типичная схема человеко-машинного взаимодействия отображает процессы восприятия информации, ее переработки, принятия решения, его реализации, а также проверки принятого решения и его коррекции в едином контуре (см. рисунок).

Большинство известных моделей ЭС по сути представляют различные вариации данной традиционной модели [6].

С точки зрения модели взаимодействия человека-оператора с технической (информационной) системой наибольший интерес вызывают работы исследователей Мичиганского университета [7],

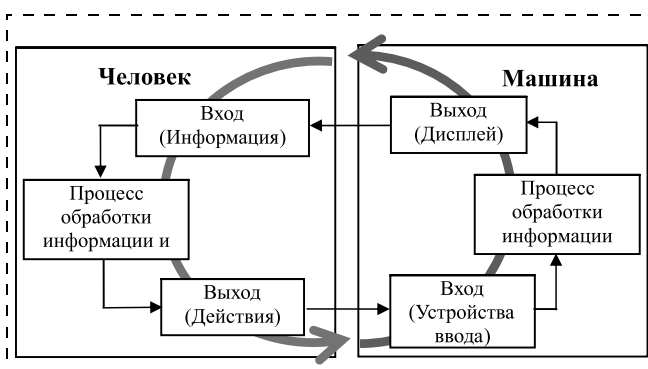


Схема человеко-машинного взаимодействия [5]

предложивших сетевую модель очередности действий человека-оператора на сенсорном (перцептивном), когнитивном и моторном уровнях. Данная модель позволяет исследовать временные интервалы, затраченные на принятие решения и формирование управляющего воздействия в зависимости от входного сенсорного сигнала. Отдельный интерес исследователей вызывают модели когнитивной деятельности человека [8—13], широко представленные в современной научной литературе.

Согласно традиционным представлениям, человек формирует некоторую систему психических образов, которая лежит в основе регуляции поведения и, в конечном счете, его жизни в целом и профессиональной деятельности, в частности. На нижнем уровне декомпозиции можно выделить [14]: модель профессиональной среды, модель профессиональной деятельности и модель субъекта деятельности. Совокупность этих моделей, по сути, определяет концептуальную модель профессиональной деятельности (КМПД), под которой можно понимать своеобразный внутренний мир человека-деятели, который базируется на большом количестве информации о профессиональной среде, о предмете труда, о целях, средствах и способах деятельности. КМПД включает в себя представление специалиста о профессиональных задачах, знание последствий правильных и ошибочных решений, готовность к нестандартным, маловероятным событиям [14].

Таким образом, оператор должен обладать широким спектром профессиональных качеств и навыков для успешного выполнения своих функциональных обязанностей, интегрированных в его КМПД. Для этого необходимы такие средства обучения и оценки профессиональной пригодности, которые учитывают современные тенденции усложнения технических систем, особенности работы на производстве и т. д.

Обзор современных средств подготовки оперативного персонала

На сегодняшний день выделяют различные виды подготовки операторов ЭС, причем основным техническим средством, обеспечивающим реализацию дидактических задач по формированию элементов профессиональной готовности оператора, является тренажер [15]. Особенностью тренажеров является их ориентация на освоение определенных алгоритмов профессиональной деятельности как важной составляющей в становлении профессионализма человека, отработку сенсорных и моторных действий.

Сегодня активно используются автоматизированные тренажерные системы (АТС) с высокой степенью автоматизации процессов управления обучением. АТС обеспечивают погружение обучаемого в среду с управляемыми параметрами, воспроизводящую всевозможные сценарии работы оператора в рамках имитационной среды [16] через

математическую модель объекта или информационную модель управления [17]. Это позволяет обеспечить тренировку оперативного персонала не только на сенсорном и моторном уровнях реагирования, но и на когнитивном уровне.

АТС получили широкое распространение в инженерной практике, где ошибки при обучении на реальных объектах могут привести к нежелательным последствиям, а их устранение — к значительным финансовым затратам [16], и позволяют осуществить быструю трансформацию теоретических знаний в практические навыки работы [17, 19]. Имеются объективные данные о снижении аварийности на производстве за счет использования АТС [20], снижении времени подготовки оперативного персонала [21], общей интенсификации учебного процесса [22, 23]. Технология имитирования при обучении в реальном масштабе времени является экономически выгодным средством при проектировании установок высокой сложности [24]. Так, например, подобную эффективность демонстрируют компании нефтеперерабатывающего сектора [25]. По оценке исследования, свыше 90 % работников нефтегазовой отрасли оценивают использование АТС как эффективное средство подготовки персонала [26].

Использование средств виртуальной реальности

Новым уровнем реализации АТС является использование технологий виртуальной реальности (ВР), представляющей "синтетический, пространственный (обычно трехмерный) мир, который воспринимается от первого лица в режиме реального времени" [27]. ВР обладает огромным потенциалом для обучения и проведения всевозможных тренингов. Основное преимущество — это воссоздание объектов реальности, процессов или явлений в рамках симулированной, на основе компьютерной графики, среды.

Впервые технология ВР в промышленных целях была использована автомобильной промышленностью. Так, использование ВР позволило убрать из технологии производства стадии по созданию реального макета автомобиля, аэродинамические эксперименты, создание салона с учетом эргономики. При использовании ВР для компоновки узлов и агрегатов прототипа 800%-ной эффективности по отношению к затратам удалось достичь компании General Motors. Компании Ford удалось за счет применения ВР вдвое снизить сроки разработки дизайна автомобиля [28].

Активное внедрение ВР свидетельствует об объективном росте интереса к этой технологии. Очевидно, что доля систем с 3D-визуализацией и использованием ВР существенно вырастет за счет тренажеров с традиционным интерфейсом [29]. Это обусловлено, с одной стороны, падением цен на устройства ВР [30], а с другой стороны, тем, что ВР перекрывает существенные недостатки тренажеров с тра-

диционным двухмерным интерфейсом, как например, невозможность обеспечения высокой степени приближенности к реальной обстановке моделируемого объекта или процесса [31].

Главное преимущество ВР заключается в том, что все действия в ней могут быть связаны с действиями в реальном мире, при этом сама среда совершенно безопасна в эксплуатации и жизни человека [32]. Это позволяет делать обучение, оценку рисков и структуру обеспечения безопасности более эффективными и реалистичными в сравнении с тренажерами, при этом обеспечив полную безопасность обучаемому и оборудованию [33].

Основной задачей тренажеров с применением ВР является формирование КМПД, имеющей большую адекватность и достоверность в сравнении с традиционными тренажерами. Для этого необходимо обеспечение следующих условий [34]:

1) *правдоподобие* (ВР должна обеспечивать правдоподобное поведение человека и легкое погружение в сценарий среды);

2) *обратная связь* (обратная связь должна влиять на пользовательские действия и содержать реальную динамику состояния среды);

3) *интерпретируемость* — пользователь должен понимать обратную связь в различных ситуациях, включая его когнитивные особенности и эмоциональное состояние на основе вербальных и невербальных событий в среде.

Комплексная реализация данных принципов обеспечила положительный практический эффект применения АТР на базе ВР в медицине [35–38], промышленности [39, 40], военном деле [41], образовании [42], коммуникации [43] и др.

При формировании КМПД или отдельных ее элементов в условиях использования средств ВР, в свою очередь, могут быть выделены следующие основные аспекты.

Психофизическое моделирование, обеспечивающее отработку психофизических навыков как эффективной формы в части преодоления производственных фобий, выработки быстроты реакций, выполнения сложных задач в соответствующих условиях и т. д. Данные характеристики обучаемого позволяют изучить специфику поведения человека в различных сгенерированных виртуальных средах (ВС), что можно использовать для преобразования в реальные практические навыки.

Мониторинг психологического, эмоционального и физического состояния оператора в той или иной симулированной ситуации позволяет получить опосредованную оценку профессиональной пригодности человека для соответствующего вида деятельности [44].

Вместе с тем использование средств ВР позволяет создавать симулированные сценарии для формирования и развития определенных профессионально важных качеств (ПВК) оперативного персонала, характерных для данного вида профессиональной деятельности. Так, например, отработ-

ка сценариев возгорания на объекте управления позволяет тренировать эмоциональную устойчивость человека [45]. Имеются данные о тренировке с использованием ВР психологической устойчивости [46], преодолении психологической напряженности в рамках выполнения сложных манипуляций [47, 50], повышении мотивации и исполнительской дисциплины [48, 49].

Отдельно стоит заострить внимание на активацию психомоторных функций человека. Так, на сегодняшний день ВР активно используется для реабилитации людей, перенесших инсульт [36]. Применительно к тренажерам, это точная отработка сложных манипуляций и выработка быстроты реакций, а также конечный контроль выполнения той или иной задачи [39, 47, 51].

На этом психофизиологический потенциал технологии ВР не исчерпан, ведутся активные работы по внедрению более естественных для человека техник манипуляций и взаимодействий в ВС. Таким примером являются так называемые компьютерные интерфейсы на основе мозговой активности (BCI, brain—computer interface). При этом уже в ближайшей перспективе BCI может заменить тактильные устройства ввода или выступать в качестве обратной связи в ВР [51, 52].

Когнитивное моделирование обеспечивает формирование когнитивных моделей восприятия. Использование трехмерной среды считается наиболее подходящей средой для имитации рабочего процесса [40], может способствовать одновременному увеличению объема и качества усвоения текущего материала, помогает исследовать такую реальность, которая в иных условиях — в силу ее неспецифичности во времени, пространстве, масштабе и т. п. или по причине безопасности — не может быть исследована [48]. Экспериментально доказано, что обучение задачам, которые выполняются в пространстве, более эффективно выполнять в ВР, по сравнению с вербальным обучением или обучением на обычном компьютере [53, 54].

Показано, что ВС более глубоко воздействует на когнитивные характеристики человека, такие как, например, долговременная память [55] или пространственное мышление [56], что позволяет осуществлять их тренировку.

Дистанционное моделирование позволяет использовать технологии ВР в качестве коммуникационной среды, не привязанной к расстоянию или конкретному местоположению, за счет взаимодействия через виртуальные объекты. Имеются доказательства положительного результата использования средств ВР в целях повышения социальной активности испытуемых [43], развития компетенции в переговорах [57].

Работа в неограниченном пространстве в ВС позволяет снять ограничения у обучающихся разных культур [42], а также обеспечить их адаптацию к различным социокультурным средам [55]. Кроме того, использование технологий распространения

Систематизация тренажеров ВР по типам обучения

Тип моделирования	Целевое предназначение	Мотивация необходимости	Примеры имитации рабочей деятельности
Психофизиологическое	Преодоление фобий, тренировка эмоциональной устойчивости, психических характеристик	Значительная психологическая сложность в выполнении задачи, в рамках аварийной или нештатной ситуации	Высокая напряженность труда. Аварии или нештатные ситуации на промышленных объектах, имитация пожара или другой опасной для жизни среды и т. д.
	Выработка исполнительской дисциплины	Необходимость выполнения четких указаний или предписаний, отработка командных навыков. Выработки ответственности в работе	Командные или исполнительские навыки в армии. Четкие предписания или порядок действий на предприятиях, где это необходимо
	Психомоторные функции	Важность и точность движений в рамках рабочего процесса	Эксплуатация сложной техники, сложные пульты управления и т. д.
Когнитивное	Тренировка пространственного мышления	Производственная необходимость знания взаиморасположения различных объектов	Инженерное проектирование сложной техники, хирургические операции и т. д.
	Тренировка памяти	Запоминание большого количества информации о технологическом процессе или регламента работы	Работа на промышленных предприятиях, эксплуатация сложной техники и т. д.
	Выполнение профессиональных задач	Точность, внимание, порядок выполнения определенной задачи или манипуляции прибором	Эксплуатация производственного оборудования, манипуляции техническими приборами и т. д.
Дистанционное	Совместное обучение	Коммуникационные практики, снятие этнокультурных барьеров	Территориальная распределенность сотрудников, удаленная демонстрация элементов виртуальности
Предметное	Реалистичные трехмерные модели	Необходимость в реалистичных, детализированных моделях или копиях реальных объектов для работы с ними	Проектирование инженерных объектов, медицинские манипуляции, изучение и работы со сложными объектами и т. д.

через сеть Интернет трехмерных объектов [58], приближенных к реальным, позволяет расширить возможности использования средств ВР для маломобильных групп населения, группового взаимодействия через виртуальные объекты, совместного использования ВР.

Предметное моделирование позволяет за счет качественной виртуализации обеспечить максимально возможное правдоподобие при имитировании работы с объектом управления, что является основой профессиональной подготовки. В этих условиях обучаемый не только изучает назначение и структуру объекта, но и воздействует на их элементы управления и анализирует реакцию объекта на внесенные управляющие воздействия, формируя модель объекта управления и профессиональной среды деятельности.

Наибольшее распространение такие модели получили в медицине при визуализации хирургических процедур обучения [35], исследовании анатомических структур [38], формировании частных индивидуальных анатомических моделей [59], моделей зубопротезирования [32].

Предметное моделирование активно используется для моделирования чрезвычайных ситуаций на реальном [60] или проектируемом объекте [61].

Таким образом, очевидно, что классификация и дифференциация тренажеров на базе ВР достаточно условна и зависит, прежде всего, от их функцио-

нальной нагрузки и задач, которые выполняют обучающиеся (см. таблицу).

Представленная систематизация также достаточно условна — она основывается на типах моделирования профессиональной деятельности и позволяет рассмотреть отдельные аспекты формирования КМПД.

Отдельный интерес представляет использование дополненной реальности (ДР), которая сегодня активно используется наряду с ВР и представляет реальность, дополненную синтетическими объектами или информацией. ДР находит применение там, где нет необходимости в полной замене среды в силу важности наличия реальных объектов. В целях имитационного обучения ДР может визуально расширять ландшафт местности виртуальными моделями зданий, добавлять текстовые подсказки над предметами, соотносить виртуальные объекты с реальными (анатомические структуры) и т. д. [62]. Имеются данные об эффективности ДР в части имитационного обучения [31].

Проблемы использования средств виртуальной и привнесенной реальности при подготовке оперативного персонала

В то же время необходимо отметить, что ВР имеет ряд недостатков, которые создают проблемы при ее использовании в части подготовки оперативного персонала ЭС. Рассмотрим наиболее рас-

пространственные ограничения: *технические, программные и имитационные*.

На сегодняшний день основными техническими недостатками являются задержки передачи сигналов с сенсоров и гироскопов устройств ВР. Таким образом, несинхронизированное движение с рендерингом трехмерного изображения не способно обеспечить эффективное иммерсивное (полное) погружение в ВС. Для устранения подобных проблем разрабатываются различные решения, как например, Timewarp. Основная идея заключается в вероятностном предсказании последующего движения, на основе которого выполняется предварительный рендеринг сцены, отображаемой на дисплее шлема ВР [63].

Другим ограничением является то, что современные стационарные шлемы ВР подключаются к высокопроизводительным компьютерам посредством проводных соединений. Соответственно, при проектировании АТС необходимо учитывать эту характерную особенность, которая может создавать трудности при разработке сценария имитационного обучения. Использование альтернативного решения в виде CAVE-систем не всегда представляется возможным из-за дороговизны оборудования и сложности в эксплуатации [64].

Существуют программные ограничения, связанные с особенностью отображения трехмерного контента. Двухмерные приложения используют WIMP (Windows, Icon, Mouse, Point) парадигму проектирования программных интерфейсов, которую невозможно перенести в трехмерные приложения ВР. Отсутствуют унифицированные техники взаимодействия в ВР из-за большого числа устройств ввода [65]. Кроме того, проектирование реалистичных трехмерных моделей экономически затратно [66].

Отдельно стоит подчеркнуть возникающие проблемы при разработке имитационного сценария в рамках проектирования АТС. Данный сценарий должен воспроизводить не только реалистичные ситуации для эффективного обучения персонала, но и нивелировать технические и программные ограничения. В свою очередь, детальная разработка сценария не всегда представляется возможной, так как невозможно точно предсказать поведение системы в различных чрезвычайных ситуациях.

Помимо этого ВС не должна создавать дисбаланс повседневных реалий с имитационной моделью. Так, известно явление когнитивного диссонанса, которое возникает в сознании человека из-за несоответствия прошлого опыта и настоящей ситуации или логического несоответствия виртуальной реальности и физического объекта (в терминологии Л. Фестингера) [67].

Отмечается, что в условиях ВР обучающиеся демонстрируют асоциальное поведение, склонны к необоснованным рискам и деструктивным действиям [68]. Отдельную сложность представляет отра-

ботка командных действий в виртуальной среде [69]. Обнаружена неспособность индивидуумов, обучающихся в виртуальной среде, к командным действиям в условиях физической реальности [70].

Заключение

Таким образом, становится очевидным, что использование тренажерных систем, включая средства ВР, сегодня достаточно обоснованно позволяет заметно снизить стоимость подготовки операторов, сроки обучения, снизить вероятность порчи дорогостоящего оборудования.

В то же время следует отметить, что в условиях ВР эвристическая деятельность индивидуума заметно отличается от деятельности в условиях реального физического мира. Также отличаются стилевые особенности обучения, связанные с различиями в динамике вырабатывания и утомляемости в условиях физического и виртуального мира.

Различны когнитивные процессы в условиях физической и виртуальной реальности, что обусловлено, прежде всего, формой и содержанием самоопределения индивидуума в пространственно-временном континууме (физическом или виртуальном) и, соответственно, различно и формирование КМПД.

Учитывая тот факт, что освоение сложных видов деятельности предполагает формирование определенных профессиональных навыков, подразумеваемая цикличность повторения действий, можно констатировать, что ВР может сформировать иную программу управления объектом, отличающуюся от программы, сформированной в условиях физической реальности.

В связи с этим выделены следующие ситуации, в которых сегодня использование ВР нецелесообразно:

- командное и групповое обучение;
- ситуации, связанные с риском возникновения когнитивного диссонанса;
- ситуации, связанные с взаимодействием оператора через ВР с реальными людьми.

При этом в настоящее время большинство исследований когнитивных механизмов с использованием ВР сводятся к изучению когнитивных особенностей при восприятии художественного текста, изучения иностранных языков, языковых аспектов коммуникации.

В связи с этим проблема оценки соответствия когнитивных стилей в физическом и виртуальном мире приобретает особую актуальность.

Отдельный интерес представляют способы организации и построения систем поддержки сенсорно-моторной и когнитивной деятельности обучающихся при освоении сложных видов деятельности в виртуальной и дополненной реальности.

1. **Охріменко О. О.** Ризик-менеджмент інвестиційних проєктів енергетичних підприємств: дис. канд. екон. наук. Киев: НТУУ "КПІ", 2016.
2. **Hopp W. J., Oyen M. P.** Agile workforce evaluation: a framework for cross-training and coordination // *Iie Transactions*. 2004. Vol. 36, N. 10. P. 919–940.
3. **Петухов И. В., Стешина Л. А.** Эргатические системы: технологическая безопасность. Воронеж: Науч. кн., 2012. 280 с.
4. **Boring R. L., Gertman D. I., Le Blanc K.** Human reliability analysis for computerized procedures // *Proceedings of the Human factors and ergonomics society 55th annual meeting*. Las Vegas, 2011. P. 1720–1724.
5. **Woods D. D., Hollnagel E.** Joint cognitive systems: Patterns in cognitive systems engineering. Boca Raton: CRC Press, 2006. 232 p.
6. **Bendell T. A.** Classification System for Reliability Models // *IEEE Transactions on reliability*. 1984. Vol. R-33, N. 2. P. 160–164.
7. **Liu Y., Feyen R., Tsimhoni O.** Queuing Network-Model Human Processor (QN-MHP): A Computational Architecture for Multitask Performance in Human-Machine Systems // *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*. March 2006. Vol. 13, N. 1. P. 37–70.
8. **Schumacher E. H.** Concurrent response-selection processes in dual-task performance: Evidence for adaptive executive control of task scheduling // *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 1999. Vol. 25. P. 791–814.
9. **Karlin L., Kestenbaum R.** Effects of number of alternatives on the psychological refractory period // *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. 1968. Vol. 20. P. 167–178.
10. **Sommer W., Leuthold H., Schubert T.** Multiple bottlenecks in information processing? An electrophysiological examination // *Psychonomic Bulletin & Review*. 2001. Vol. 8. P. 81–88.
11. **Jiang Y. H., Saxe R., Kanwisher N.** Functional magnetic resonance imaging provides new constraints on theories of the psychological refractory period // *Psychological Science*. 2004. Vol. 15. P. 390–396.
12. **Ruthruff E., Johnston J. C., Van Selst M.** Why practice reduces dual-task interference // *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 2001. Vol. 27. P. 3–21.
13. **Oberauer K., Kliegl R.** Simultaneous cognitive operations in working memory after dual-task practice // *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. Vol. 30. 2004. P. 689–707.
14. **Дружилов С. А.** Концептуальная модель профессиональной деятельности как психологическая детерминанта профессионализма // *Психологические исследования*. 2013. Т. 6, № 29. С. 4. URL: <http://psystudy.ru> (дата обращения: 15.05.2017).
15. **Сергеев С. Ф.** Инженерная психология и эргономика. М.: НИИ школьных технологий, 2008. С. 136.
16. **Трухин А. В.** Анализ существующих в РФ тренажерно-обучающих систем // *Открытое и дистанционное образование. Ассоциация образовательных и научных учреждений "Сибирский открытый университет" (Томск)*. 2008. № 1. С. 32–39.
17. **Копытенкова О. И., Алиев О. Т.** Анализ современных автоматизированных тренажерно-обучающих комплексов для подготовки локомотивных бригад // *Общетехнические задачи и пути их решения*. 2014. С. 143–150.
18. **Барашкин Р. Л. и др.** Компьютерный тренажерный комплекс процессов подготовки нефти и газа к транспорту // *Территория нефтегаз*. 2015. № 5. С. 27–31.
19. **Strayer D. L., Drews F. A.** Simulator Training Improves Driver Efficiency: Transfer From The Simulator To The Real World / D. L. Strayer, // *Proceedings of the Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design. Simulator Training Improves Driver Efficiency: Transfer From The Simulator To The Real World*. P. 190–193.
20. **Дозорцев В. М. и др.** Компьютерный тренинг операторов: непреходящая актуальность, новые возможности, человеческий фактор // *Автоматизация в промышленности*. Июль 2015. URL: <http://www.avtprom.ru> (дата обращения: 15.05.2017).
21. **Дозорцев В. М.** Насколько полезны компьютерные тренажеры для обучения операторов? Голос пользователей // *Автоматизация в промышленности*. Июль 2016. URL: <http://www.avtprom.ru> (дата обращения: 15.05.2017).
22. **Беспалов Б. И.** Психодиагностика профессионально важных качеств и профотбор диспетчеров пожарной службы "01": Психология // *Вестн. Моск. ун-та*. 1998. № 3. С. 79–94.
23. **Рабенко В. С., Мошкарин А. В., Битеряков В. Ф.** Методические рекомендации к расчету экономической эффективности от внедрения тренажеров для подготовки оперативного персонала тепловых электрических станций // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2004. № 2. С. 30–36.
24. **Перкинс Т.** Техника моделирования в обучении операторов // *Бюллетень МАГАТЭ*. 1985. С. 21–27.
25. **Заец Р. М., Белкин А. К., Моссуммадзе Э. М.** Использование современных интерактивных учебных программных комплексов в повышении квалификации обслуживающего персонала газоперерабатывающих, химических и нефтехимических производств // *Башкирский химический журнал*. 2007. Т. 14, № 3. С. 106.
26. **Nordstien S. R., Nordhus H.** Economic benefits of training simulators // *Economic benefits of training simulators*. 2012. P. 61–64.
27. **Bowman D.** 3D User Interfaces. Theory And Practice // *3D User Interfaces. Theory And Practice*. Boston, MA, 2004. P. 7.
28. **Щадилов А. Е.** Виртуальная реальность и 3-D визуализация с применением современных информационных технологий // *Информационные технологии в экономике, управлении и образовании: Сборник научных трудов / Под ред. проф. В. В. Трофимова*. СПб.: Изд-во СПбГУЭФ. 2010. С. 89.
29. **Дозорцев В. М.** Мировой рынок компьютерных тренажеров для обучения операторов: тенденции, вызовы, прогнозы // *Автоматизация в промышленности*. 2016. С. 38.
30. **Bellini H.** Virtual & Augmented Reality // *Goldman Sachs*. 2016. P. 8.
31. **Satyandra K. et al.** Training in Virtual Environments A Safe, Cost-Effective, and Engaging Approach to Training] // *Training in Virtual Environments A Safe, Cost-Effective, and Engaging Approach to Training: CECD/ETC Series*. University of Maryland, College Park, Maryland, 2008. P. 1.
32. **Haddawy P.** Development of a Dental Skills Training Simulator Using Virtual Reality and Haptic Device // *MultiScience — XXX. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference*. University of Miskolc, Hungary, 2016.
33. **Казанцев В. А., Ричмонд П.** Новые направления развития тренажерных комплексов для обучения операторов промышленных установок // *Автоматизация в промышленности*. 2011. С. 13–17.
34. **Kenny P., Hartholt A., Gratch J., Swartout W., Traum D., Marsella S., Piepol D.** Building Interactive Virtual Humans for Training Environments // *Interservice/Industry Training, Simulation, and Education Conference (I/ITSEC)*. 2007. P. 4.
35. **Schmid L., Glassel A.** Therapists Perspective on Virtual Reality Training in Patients after Stroke: A Qualitative Study Reporting Focus Group Results from Three Hospitals. 2016. P. 1–13.
36. **Badia S. et al.** Using a Hybrid Brain Computer Interface and Virtual Reality System to Monitor and Promote Cortical Reorganization through Motor Activity and Motor Imagery Training // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2013. Vol. 2, N. 21. P. 174–181.
37. **Riva G. et al.** Applications of virtual environments in medicine // *Methods of information in medicine*. 2003. Vol. 42, N. 5. P. 524–534.
38. **Колсанов А. и др.** Моделирование и визуализация сложных анатомических структур // *Моделирование и визуализация сложных анатомических структур в системе виртуальной реальности для создания обучающих медицинских тренажеров на базе АПК "виртуальный хирург"*. 2013. Т. 15, № 4. С. 242–247.
39. **Михайлюк М., Торгашев М.** Моделирование и визуализация 3D виртуальных пультов управления в тренажерных системах // *Материалы XXIV Международной конференции по компьютерной графике и зрению*, 30 сентября — 3 октября 2014. Ростов-на-Дону, 2014. С. 27–29.
40. **Хафизов Ф. Ш., Кудрявцев А. А., Шевченко Д. И.** Интегрированные обучающие системы для специалистов трубопроводного транспорта нефти // *Нефтегазовое дело*. 2011. № 3. С. 356–370.

41. **Rizzo A.** et al. Human emotional state and its relevance for military VR training // The Proceedings of the 11th International Conference on Human Computer Interaction. 2005. P. 777–780.
42. **Pantelidis V. S.** Reasons to use virtual reality in education and training courses and a model to determine when to use virtual reality // Themes in Science and Technology Education. 2009. Vol. 2. P. 59–70.
43. **Kandalafi M.** et al. Virtual Reality Social Cognition Training for Young Adults with High-Functioning Autism. Springer, 2012.
44. **Понов Д. И.** Использование технологий виртуальной реальности для определения профессиональной пригодности и подготовки кадров опасных профессий // Виртуальная и дополненная реальность-2016: состояние и перспективы. Москва, 2016. С. 33–36.
45. **Louka M. N., Balducci C.** Virtual Reality Tools for Emergency Operation Support and Training // Proc. of TIEMS (The International Emergency Management Society), Oslo, 2001.
46. **Satyandra K.** et al. Training in Virtual Environments A Safe, Cost-Effective, and Engaging Approach to Training // Training in Virtual Environments A Safe, Cost-Effective, and Engaging Approach to Training: CECD/ETC Series. University of Maryland, College Park, Maryland, 2008. P. 72.
47. **Everson T., McDermott C.** Astronaut training using Virtual Reality in a Neutrally Buoyant Environment // School of Engineering, Australia DesTech Conference Proceedings The International Conference on Design and Technology. 2017. P. 319–326.
48. **Зинченко Ю. П.** и др. Технологии виртуальной реальности: методологические аспекты, достижения и перспективы. 2010. Т. 2 // Национальный психологический журнал. № 4. С. 64–71.
49. **Renter H.** Virtual Reality in the Military: Present and Future // 3rd Twente Student Conference on IT. University of Twente, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, 2005.
50. **Konieczny J., Meyer G., Shimizu C., Heckman J.** VR Spray Painting for Training and Design // VR spray painting for training and design. VRST (2008). 2008.
51. **Lotte F.** et al. Combining BCI with Virtual Reality // Towards New Applications and Improved BCI. 2012. P. 1–24.
52. **S. B. i Badia** et al. Using a Hybrid Brain Computer Interface and Virtual Reality System to Monitor and Promote Cortical Reorganization through Motor Activity and Motor Imagery Training // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2013. Vol. 2, N. 21. P. 174–181.
53. **Gonzalez-Franco M., Rodrigo P.** Immersive Mixed reality for Manufacturing Training: Frontiers in Robotics and AI // Frontiers in Robotics and AI. 2017. Vol. 4, N. 3.
54. **Mitrovic A.** et al. A Virtual Reality Environment for Prospective Memory Training // UMAP Workshops. 2014. P. 93–98.
55. **McComas J.** Cyber Psychology & Behavior // Children's Transfer of Spatial Learning from Virtual Reality to Real Environments. 1998. Vol. 1. P. 121–127.
56. **Broekens J.** et al. Virtual reality negotiation training increases negotiation knowledge and skill // International Conference on Intelligent Virtual Agents, Springer Berlin Heidelberg, 2012. P. 218–230.
57. **Koltko-Rivera M. E.** The potential societal impact of virtual reality // Advances in virtual environments technology: Musings on design, evaluation, and applications. 2005. Vol. 9.
58. **Guardia L., Scaduto M. L.** Sharing on Web 3D Models of Ancient Theatres // A Methodological Workflow. 2016. P. 483–490.
59. **Torner J., Gyme S., Alpieste F.** Virtual reality application applied to biomedical models reconstructed from CT scanning // Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision. 2016. Vol. 24. P. 21–22.
60. **Rossmann J.** et al. Simulation in the woods: from remote sensing based data acquisition and processing to various simulation applications // Winter Simulation Conference. 2011. P. 984–996.
61. **Горбунова А. А.** Безопасное моделирование чрезвычайных ситуаций в реальной среде посредством дополненной реальности // Виртуальная и дополненная реальность-2016: состояние и перспективы. Москва, 2016. С. 110–112.
62. **Lee K.** Augmented Reality in Education and Training // TechTrends. — 2012. Vol. 56, N. 2. P. 13–21.
63. **Гребешков А. А.** Проблемы в использовании VR // Виртуальная и дополненная реальность-2016: состояние и перспективы. Москва, 2016. С. 110–112.
64. **Manjrekar S.** et al. CAVE: An Emerging Immersive Technology — A Review // UKSim-AMSS 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation. IEEE, 2014. P. 130–135.
65. **Bowman D. A.** et al. A Survey of Usability Evaluation in Virtual Environments // Classification and Comparison of Methods. 2002. Vol 11, N. 4. P. 404–424.
66. **URL:** https://thinkmobiles.com/blog/how-much-vr-application-development-cost/?ab=1&utm_expid=136192882-12.myUhRdQqQCKexWTgdQ-2Tg.1&utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.ru%2F (дата обращения: 15.05.2017)
67. **Фестингер Л.** Теория когнитивного диссонанса. СПб.: Речь, 2000. С. 19–24.
68. **Yee N., Bailenson J.** The Proteus effect: The effect of transformed self-representation on behavior // Human communication research. 2007. Vol. 33, N. 3. P. 271–290.
69. **Hughes J.** Some 'real' problems of 'virtual' teamwork // Lancaster University. 1998. С. 18–32.
70. **Allard T.** US Navy and Marine Corps requirements and challenges: Virtual environment and component technologies // The Capability of Virtual Reality to Meet Military Requirements, USA, 5–9 December 1997. P. 1–5.

Virtual Reality Simulators: Problems and Perspectives of Using as a Means of Training Operational Personnel

A. E. Glazyrin, glazyrin.andre@mail.ru, **I. V. Petukhov**, PetuhovIV@volgatech.net✉,
L. A. Steshina, SteshinaLA@volgatech.net,
 Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation

Corresponding author: **Petukhov Igor V.**, D. Sc., Professor,
 Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation,
 e-mail: PetuhovIV@volgatech.net

Accepted on August 07, 2017

The article presents an overview of modern approaches to the use of virtual reality tools as a means of training operational staff of ergatic systems. The most important aspect in the preparation of the operator of the ergatic system is the reproduction of the psychophysiological state, as in real professional practice. Virtual reality can have a profound psycho-physiological effect, creating an environment close to the real situation. Separate accents are made on the problems of using virtual and augmented reality tools related to probabilistic cognitive dissonance arising in the management of real physical objects. At the same time, virtual reality allows more effective activation of cognitive processes in imitative learning. The prospects for using virtual

reality tools in vocational training are outlined. An extensive analysis and systematization of the use of virtual reality as simulators has been carried out. Recommendations for the preparation of professionally important qualities of operators of ergatic systems are given depending on the type of simulation training in virtual reality. Particular attention was paid to the purpose of simulators of virtual reality and examples of simulating work activity. The limitations and disadvantages of virtual systems in simulation training are considered. The material presented can open new prospects for further research studies. It seems interesting to those who work in the field of ergatic systems and human-computer interaction.

Keywords: virtual reality, augmented reality, simulator, simulator, human operator, ergatic systems

Acknowledgements: The results of the research were obtained with the support of the grant of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 25.1095.2017/4.6.

For citation:

Glazyrin A. E., Petukhov I. V., Steshina L. A. Virtual Reality Simulators: Problems and Perspectives of Using as a Means of Training Operational Personnel, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 767–775.

DOI: 10.17587/mau.18.767-775

References

1. Ohrimenko O. O. *Rizik-menedzhment investitsijnih proektiv energetichnih pidpriemstv: dis. kand. ekon. nauk.* (Rizik-management of investment projects in energy-consuming enterprises), Kiev, NTUU "KPI", 2016 (in Ukrainian).
2. Hopp W. J., Oyen M. P. Agile workforce evaluation: a framework for cross-training and coordination, 2004, vol. 36, no. 10, pp. 919–940.
3. Petuhov I. V., Steshina L. A. *Jergaticheskie sistemy: tehogenaya bezopasnost* (Ergatic systems: technogenic security), Voronezh, Nauch. kn., 2012, 280 p. (in Russian).
4. Boring R. L., Gertman D. I., Le Blanc K. Human reliability analysis for computerized procedures, *Proceedings of the Human factors and ergonomics society 55th annual meeting*, Las Vegas, 2011, pp. 1720–1724.
5. Woods D. D., Hollnagel E. Joint cognitive systems: Patterns in cognitive systems engineering, Boca Raton, CRC Press, 2006, 232 p.
6. Bendell T. A. Classification System for Reliability Models, *IEEE Transactions on reliability*, 1984, vol. R-33, no. 2, pp. 160–164.
7. Liu Y., Feyen R., Tsimhoni O. Queuing Network-Model Human Processor (QN-MHP): A Computational Architecture for Multitask Performance in Human-Machine Systems, *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, March 2006, vol. 13, no. 1, pp. 37–70.
8. Schumacher E. H. Concurrent response-selection processes in dual-task performance: Evidence for adaptive executive control of task scheduling, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1999, vol. 25, pp. 791–814.
9. Karlin L., Kestenbaum R. Effects of number of alternatives on the psychological refractory period, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1968, vol. 20, pp. 167–178.
10. Sommer W., Leuthold H., Schubert T. Multiple bottlenecks in information processing? An electrophysiological examination, *Psychonomic Bulletin & Review*, 2001, vol. 8, pp. 81–88.
11. Jiang Y. H., Saxe R., Kanwisher N. Functional magnetic resonance imaging provides new constraints on theories of the psychological refractory period, *Psychological Science*, 2004, vol. 15, pp. 390–396.
12. Ruthruff E., Johnston J. C., Van Selst M. Why practice reduces dual-task interference, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 27, 2001, pp. 3–21.
13. Oberauer K., Kliegl R. Simultaneous cognitive operations in working memory after dual-task practice, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2004, vol. 30, pp. 689–707.
14. Druzhilov S. A. *Konceptual'naja model' professional'noj dejatel'nosti kak psihologicheskaja determinanta professionalizma* (The conceptual model of professional activity as a psychological determinant of professionalism), *Psihologicheskie issledovanija*, 2013, vol. 6, no 29, p. 4, available at: <http://psystudy.ru> (date of access 15.05.2017) (in Russian).
15. Sergeev S. F. *Inzhenernaja psihologija i jergonomika* (Engineering psychology and ergonomics), Moscow, Research Institute of School Technology, 2008, 136 p. (in Russian).
16. Truhin A. V. *Analiz sushhestvujushih v RF trenazherno-obuchajushih sistem* (Analysis of existing simulator training systems in Russia), *Otkrytoe i distancionnoe obrazovanie. Associacija obrazovatel'nyh i nauchnyh uchrezhdenij "Sibirskij otkrytyj universitet"*, Tomsk, 2008, no. 1, pp. 32–39 (in Russian).
17. Kopytenkova O. I., Aliev O. T. *Analiz sovremennyh avtomatizirovannyh trenazherno-obuchajushih kompleksov dlja podgotovki lokomotivnyh brigad* (Analysis of modern automated training and training complexes for the preparation of locomotive teams), *General technical tasks and ways to solve them*, 2014, pp. 143–150 (in Russian).
18. Barashkin R. L. et al. *Komp'juternyj trenazhernyj kompleks processov podgotovki nefti i gaza k transportu* (Computer simulator complex of the processes of oil and gas preparation for transport), *Territory of oil and gas*, 2015, no. 5, pp. 27–31 (in Russian).
19. Strayer D. L., Drews F. A. Simulator Training Improves Driver Efficiency: Transfer From The Simulator To The Real World, *PROCEEDINGS of the Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design. Simulator Training Improves Driver Efficiency: Transfer From The Simulator To The Real World*, pp. 190–193.
20. Dozorov V. M. et al. *Komp'juternyj trening operatorov: neprehodjashaja aktual'nost', novye vozmozhnosti, chelovecheskij faktor* (Computer training of operators: lasting relevance, new opportunities, human factor), *Avtomatizacija v promyshlennosti*, July, 2015, available at: <http://www.avtprom.ru> (date of access: 15.05.2017) (in Russian).
21. Dozorov V. M. *Naskol'ko polezny komp'juternye trenazhery dlja obuchenija operatorov? Golos pol'zovatelej* (How useful are computer simulators for operator training? Voice of users), *Avtomatizacija v promyshlennosti*, July, 2016, available at: <http://www.avtprom.ru> (date of access: 15.05.2017) (in Russian).
22. Bepalov B. I. *Psihodiagnostika professional'no vazhnyh kachestv i profotbor dispetcherov pozharnoj sluzhby "01": Psihologija* (Psychodiagnostics of professionally important qualities and professional selection of dispatchers of the fire service "01": Psychology), *Vestn. Moscow. University*, 1998, no. 3, pp. 79–94 (in Russian).
23. Rabenko V. S., Moshkarin A. V., Biterjakov V. F. *Metodicheskie rekomendacii k raschetu jekonomicheskoi jeffektivnosti ot vnedrenija trenazherov dlja podgotovki operativnogo personala teplovych jelektricheskijh stancij* (Methodical recommendations to the calculation of economic efficiency from the introduction of simulators for the training of operational personnel of thermal power plants), *Jenergoberezenie i vodopodgotovka*, 2004, no. 2, pp. 30–36 (in Russian).
24. Perkins T. *Tehnika modelirovanija v obuchenii operatorov: Bjuleten' MAGATJe* (Simulation technique in operator training: IAEA Bulletin), 1985. — pp. 21–27) (in Russian).
25. Zaec R. M., Belkin A. K., Movsumzade Je. M. *Ispolzovanie sovremennyh interaktivnyh uchebnyh programnyh kompleksov v povyshenii kvalifikacii obsluzhivajushhego personala gazopererabatyvajushih, himicheskijh i neftehimicheskijh proizvodstv* (The use of modern interactive educational software in the improvement of qualification of the personnel of gas processing, chemical and petrochemical industries), *Bashkirskij Himicheskij Zhurnal*, 2007, vol. 14, no. 3, pp. 106 (in Russian).
26. Nordstien S. R., Nordhus H. Economic benefits of training simulators, *Economic Benefits of Training Simulators*, 2012, pp. 61–64.
27. Bowman D. *3D User Interfaces. Theory And Practice*, 3D User Interfaces. Theory And Practice, Boston, MA, 2004, pp. 7.
28. Shhadilov A. E. *Virtual'naja real'nost' i 3-D vizualizacija s primeneniem sovremennyh informacionnyh tehnologij* (Virtual reality and 3-D visualization using modern information technologies), *Informacionnye Tehnologii v Jekonomike, Upravlenii i Obrazovanii*, SPb., Publishing house of SPbGUJEF, 2010, pp. 89 (in Russian).
29. Dozorov V. M. *Mirovoj rynek komp'juternykh trenazherov dlja obuchenija operatorov: tendencii, vyzovy, prognozy* (World market of computer simulators for operator training: trends, challenges, forecasts), *Avtomatizacija v Promyshlennosti*, 2016, p. 38 (in Russian).

30. **Bellini H.** Virtual & Augmented Reality, Goldman Sachs, 2016, p. 8.
31. **Satyandra K.** et al. Training in Virtual Environments A Safe, Cost-Effective, and Engaging Approach to Training, *Training in Virtual Environments A Safe, Cost-Effective, and Engaging Approach to Training: CECD/ETC Series*, University of Maryland, College Park, Maryland, 2008, p. 1.
32. **Haddawy P.** Development of a Dental Skills Training Simulator Using Virtual Reality and Haptic Device, *MultiScience — XXX. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference*, University of Miskolc, Hungary, 2016.
33. **Kazancev V. A., Richmond P.** *Novye napravleniya razvitiya trenazhernykh kompleksov dlya obucheniya operatorov promyshlennyykh ustanovok* (New Directions for the Development of Training Complexes for the Training of Operators of Industrial Installations), *Avtomatizatsiya v Promyshlennosti*, 2011, pp. 13–17 (in Russian).
34. **Kenny P., Hartholt A., Gratch J., Swartout W., Traum D., Marsella S., Piepol D.** Building Interactive Virtual Humans for Training Environments, *Interservice/Industry Training, Simulation, and Education Conference (I/ITSEC)*, 2007, p. 4.
35. **Schmid L., Glassel A.** Therapists Perspective on Virtual Reality Training in Patients after Stroke: A Qualitative Study Reporting Focus Group Results from Three Hospitals, 2016, pp. 1–13.
36. **Badia S.** et al. Using a Hybrid Brain Computer Interface and Virtual Reality System to Monitor and Promote Cortical Reorganization through Motor Activity and Motor Imagery Training, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2013, vol. 2, no. 21, pp. 174–181.
37. **Riva G.** et al. Applications of virtual environments in medicine // Methods of information in medicine, 2003, vol. 42, no. 5, pp. 524–534.
38. **Kolsanov A.** et al. *Modelirovanie i vizualizatsiya slozhnykh anatomicheskikh struktur* (Modeling and visualization of complex anatomical structures), *Modelirovanie i vizualizatsiya slozhnykh anatomicheskikh struktur v sisteme virtual'noy real'nosti dlya sozdaniya obuchajushhih medicinskih trenazherov na baze APK "virtual'nyy hirurg"*, 2013, vol. 15, no. 4, pp. 242–247 (in Russian).
39. **Mihajljuk M., Torgashev M.** *Modelirovanie i vizualizatsiya 3D virtual'nykh pul'tov upravleniya v trenazhernykh sistemah* (Simulation and visualization of 3D virtual control panels in simulator systems), *The Proceedings of the 24rd International Conference on Computer Graphics and Vision*, September 30 — October 3, 2014, Rostov-on-Don, Russia, 2014, pp. 27–29 (in Russian).
40. **Hafizov F. Sh., Kudrjavcev A. A., Shevchenko D. I.** *Integrirovannyye obuchajushhie sistemy dlya specialistov truboprovodnogo transporta nefti* (Integrated training systems for oil pipeline transport specialists), *Neftegazovoe Delo*, 2011, no. 3, pp. 356–370 (in Russian).
41. **Rizzo A.** et al. Human emotional state and its relevance for military VR training, *The Proc. of the 11th International Conference on Human Computer Interaction*, 2005, pp. 777–780.
42. **Pantelidis V. S.** Reasons to use virtual reality in education and training courses and a model to determine when to use virtual reality, *Themes in Science and Technology Education*, 2009, vol. 2, pp. 59–70.
43. **Kandalafi M.** et al. Virtual Reality Social Cognition Training for Young Adults with High-Functioning Autism, Springer, 2012.
44. **Popov D. I.** *Ispol'zovanie tehnologii virtual'noy real'nosti dlya opredeleniya professional'noy prigodnosti i podgotovki kadrov opasnykh professij* (The use of virtual reality technologies to determine the professional suitability and training of personnel in hazardous occupations), *Virtual'naja i dopolnennaja real'nost'-2016: sostojanie i perspektivy*, Moscow, 2016, pp. 33–36 (in Russian).
45. **Louka M. N.** et al. Virtual Reality Tools for Emergency Operation Support and Training, *Proceedings of TIEMS (The International Emergency Management Society)*, Oslo, 2001.
46. **Gupta S. K.** et al. Training in Virtual Environments A Safe, Cost-Effective, and Engaging Approach to Training, *Training in Virtual Environments A Safe, Cost-Effective, and Engaging Approach to Training: CECD/ETC Series*, University of Maryland, College Park, Maryland, 2008, p. 72.
47. **Everson T., McDermott C.** Astronaut training using Virtual Reality in a Neutrally Buoyant Environment, *School of Engineering, Australia DesTech Conference Proceedings The International Conference on Design and Technology*, 2017, pp. 319–326.
48. **Zinchenko Ju. P.** et al. *Tehnologii virtual'noj real'nosti: metodologicheskie aspekty, dostizheniya i perspektivy* (Virtual reality technologies: methodological aspects, achievements and prospects), *Natsionalny Psikhologicheskii Zhurnal*, 2010, vol. 2, no. 4, pp. 64–71 (in Russian).
49. **Renter H.** Virtual Reality in the Military: Present and Future, *3rd Twente Student Conference on IT*, University of Twente, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, 2005.
50. **Konieczny J., Meyer G., Shimizu C., Heckman J.** VR Spray Painting for Training and Design, *VR spray painting for training and design. VRST (2008)*, 2008.
51. **Lotte F.** et al. Combining BCI with Virtual Reality: Towards New Applications and Improved BCI, 2012, pp. 1–24.
52. **S. B. i Badia** et al. Using a Hybrid Brain Computer Interface and Virtual Reality System to Monitor and Promote Cortical Reorganization through Motor Activity and Motor Imagery Training, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2013, vol. 2, no. 21, pp. 174–181.
53. **Gonzalez-Franco M., Rodrigo P.** Immersive Mixed reality for Manufacturing Training: Frontiers in Robotics and AI, *Frontiers in Robotics and AI*, 2017, vol. 4, no. 3.
54. **Mitrovic A.** et al. A Virtual Reality Environment for Prospective Memory Training, *UMAP Workshops*, 2014, pp. 93–98.
55. **McComas J.** CyberPsychology & Behavior, *Children's Transfer of Spatial Learning from Virtual Reality to Real Environments*, 1998, vol. 1, pp. 121–127.
56. **Broekens J.** et al. Virtual reality negotiation training increases negotiation knowledge and skill, *International Conference on Intelligent Virtual Agents*, Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 218–230.
57. **Koltko-Rivera M. E.** The potential societal impact of virtual reality, *Advances in virtual environments technology: Musings on design, evaluation, and applications*, 2005, vol. 9.
58. **Guardia L., Scaduto M. L.** Sharing on Web 3D Models of Ancient Theatres, *A Methodological Workflow*, 2016, pp. 483–490.
59. **Torner J., Gyme S., Alpieste F.** Virtual reality application applied to biomedical models reconstructed from CT scanning, *Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision*, 2016, vol. 24, pp. 21–22.
60. **Rossmann J.** et al. Simulation in the woods: from remote sensing based data acquisition and processing to various simulation applications, *Winter Simulation Conference*, 2011, pp. 984–996.
61. **Gorbunova A. A.** *Bezopasnoe modelirovanie chrezvychajnykh situacij v real'noj srede posredstvom dopolnennoj real'nosti* (Safe modeling of emergencies in a real environment through augmented reality), *Virtual'naja i dopolnennaja real'nost'-2016: sostojanie i perspektivy*, Moscow, 2016, pp. 110–112 (in Russian).
62. **Lee K.** Augmented Reality in Education and Training, *TechTrends*, 2012, vol. 56, no. 2, pp. 13–21.
63. **Grebeshkov A. A.** *Problemy v ispol'zovanii VR* (Problems in using VR), *Virtual'naja i dopolnennaja real'nost'-2016: sostojanie i perspektivy*, Moscow, 2016, pp. 110–112 (in Russian).
64. **Manjrekar S.** et al. CAVE: An Emerging Immersive Technology — A Review, *UKSim-AMSS 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation*, IEEE, 2014, pp. 130–135.
65. **Bowman D. A.** et al. A Survey of Usability Evaluation in Virtual Environments, *Classification and Comparison of Methods*, 2002, vol. 11, no. 4, pp. 404–424.
66. **Available at:** https://thinkmobiles.com/blog/how-much-vr-application-development-cost/?ab=1&utm_exp=136192882-12.myUhRdQqQCKexWTgdQ-2Tg.1&utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.ru%2F (date of access: 15.05.2017)
67. **Festinger L.** *Teorija kognitivnogo dissonansa* (Theory of cognitive dissonance), SPb., Rech', 2000, pp. 19–24 (in Russian).
68. **Yee N., Bailenson J.** The Proteus effect: The effect of transformed self-representation on behavior, *Human communication research*, 2007, vol. 33, no. 3, pp. 271–290.
69. **Hughes J.** et al. Some 'real' problems of 'virtual' teamwork, Lancaster University, 1998, pp. 18–32.
70. **Allard T.** US Navy and Marine Corps requirements and challenges: Virtual environment and component technologies // The Capability of Virtual Reality to Meet Military Requirements, USA, 5–9 December 1997. P. 1–5.

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 I. Концепция и базовые задачи¹

Сетевая организация бизнеса рассматривается в настоящее время как новая перспективная модель ведения распределенного бизнеса на современном этапе развития цифровой экономики. В работе проанализировано текущее состояние исследований и разработок в этой области, сформулированы ее ключевые проблемы и вызовы, а также предложена концепция реализации парадигмы производственной В2В-сети как самоорганизующейся открытой сети предприятий, построенной на основе метафоры многоагентных систем. Проведен содержательный анализ базового множества задач управления, которые реализуют самоорганизующийся стиль функционирования сети, а также задач программно-коммуникационной инфраструктуры, поддерживающей распределенный стиль взаимодействия компонент системы управления.

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

Введение

Сетевая организация бизнеса, реализуемая в концепции В2В-сети, — это относительно новое явление, которое стало предметом исследований и разработок после 2000 г. в рамках ряда программ Европейской комиссии (FP6, FP7, Горизонт 2020). Она рассматривается как новая перспективная модель ведения бизнеса в Европе. Аналогичные программы имеются также в США и в Азиатско-Тихоокеанском регионе. Анализ тенденций в области современных моделей территориально распределенного бизнеса показывает, что в настоящее время ведение бизнеса в соответствии с такой моделью становится объективной необходимостью в связи с глобализацией рынка рабочей силы, специализацией предприятий и разделением труда, ростом сложности продукции и сервисов, а также в связи с активным развитием различных моделей поддержки распределенного бизнеса облачными ресурсами и сервисами.

Организация бизнеса на основе В2В-сетей имеет ряд специфических новых черт и предоставляет ряд принципиально новых возможностей кооперативного ведения бизнеса, в частности, новые возможности для оптимизации выбора бизнес-партнеров, вовлекаемых в совместное производство сложного продукта, или обеспечение сложного сервиса. Типичными примерами здесь являются производственные В2В-сети, сети транспортных компаний,

реализующих интермодальную доставку грузов, и др. Эта модель привлекательна для рынка, поскольку она оказывается экономически выгодной за счет того, что позволяет значительно лучше использовать специализацию компаний и их ресурсы, сократить накладные расходы, снизить стоимость бизнес-процессов за счет использования облачных сервисов и в итоге усилить конкурентные преимущества всех компаний, вовлеченных в бизнес такой формы.

В данной работе рассматривается концепция распределенного бизнеса на основе самоорганизующихся В2В-сетей. Хотя концепция В2В-сети является достаточно общей и может рассматриваться как распределенная модель ведения практически любого бизнеса, в работе внимание акцентируется на производственных сетях. В такой сети в качестве узлов В2В-сети выступают конкретные территориально распределенные предприятия и компании, которые кооперируются для совместного выполнения распределенных бизнес-процессов по производству сложной продукции. Для такой сети в работе предложена типовая многоагентная архитектура, выявлены базовые задачи управления процессами распределенного производства, а также сформулированы инфраструктурные задачи, которые необходимо решать для поддержки взаимодействия и коммуникации узлов производственной В2В-сети.

Далее в разделе 1 приводится краткий анализ современного состояния исследований и разработок в области производственных В2В-сетей и формулируются ключевые проблемы и вызовы концептуального уровня, связанные с их разработкой. В разделе 2 анализируется понятие В2В-сети и ее

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

концептуальная архитектура, а также дается краткая характеристика основных задач, которые должны решаться в сети. Особенностью B2B-сети является ее ориентация на распределенное выполнение сложных бизнес-процессов, при котором различные компоненты одного и того же бизнес-процесса могут выполняться различными узлами сети. По этой причине ключевые проблемы, связанные с функционированием B2B-сети, касаются координации процессов распределенного выполнения бизнес-процессов, в частности, планирования этих процессов и составления расписания их выполнения. В заключении дается оценка особенностей предложенной модели B2B-сети производственных предприятий, а также модели программно-коммуникационной среды (инфраструктуры), поддерживающей взаимодействие территориально распределенных узлов сети. Алгоритмические аспекты функционирования самоорганизующейся B2B-сети производственных предприятий анализируются во второй части работы

1. Краткий анализ состояния исследований и разработок в области производственных B2B-сетей

Интерес к производственным B2B-сетям возник еще в конце 1990-х годов, хотя реальные исследования и разработки этой проблемы были начаты относительно недавно. Публикации на эту тему появились в литературе в начале 2000-х годов, однако современная направленность в них появилась только после 2005 года. В первых работах использовался более ранний термин для B2B-сетей, а именно *С-бизнес* как сокращение от названия *Collaborative Business*. Но уже в них отмечалась важность *глубокой интеграции предприятий* с акцентом на совместимость их программного обеспечения и моделей данных.

В работе [1] рассматриваются особенности управления распределенными бизнес-процессами по сравнению с реализацией их внутри одной компании и дается оценка их влияния на модели внутренних процессов компании. В ней формируются требования к этим моделям, а также предлагается программа актуальных исследований, акцентирующая внимание на следующих задачах:

1) создание общей метамодели B2B-процессов на базе инкрементного языка, управляемого моделью (англ. *model-driven*), типа языка *POP* [2] или иного языка на основе стандарта *XML* типа *EPC Markup Language (EPML)* [3];

2) обеспечение общей семантической базы описания бизнес-процессов, основу которого составляют общие онтологии. Однако проблема создания онтологий и средств семантического доступа к ее содержанию к настоящему времени пока имеет решение, проверенное только на уровне программных прототипов.

В работе [4] отмечается ключевая роль проблем, которые возникают на уровне кросс-организационных бизнес-отношений. Авторы акцентируют внимание на стандартизации управления бизнес-про-

цессами в B2B-сетях и на вопросах согласования онтологий. Эта работа базируется на анализе опыта одной из крупнейших производственных B2B-сетей, а именно сети *RosettaNet* [5], включающей в себя около 500 компаний из области высоких технологий и электроники, в числе которых AMD, Cisco Systems, Intel, Oracle, Qualcomm, SAP, Samsung Electronics и др.

Одним из наиболее распространенных европейских стандартов B2B-взаимодействия является *EDIFACT* (англ. *Electronic Data Interchange For Administration, Commerce and Transport*), стандартизованный ISO под эгидой ООН как ISO 9735. Этот стандарт предоставляет множество синтаксических правил для описания данных и протокол обмена (*I-EDI*), ориентированный на обмен сообщениями участников из разных стран и индустрий.

Начиная примерно с 2002 года проблема создания и стандартизации B2B-сетей стала рассматриваться как одна из ключевых проблем европейских, азиатских [6, 7] и американских программ в области B2B-сетей. Например, в программе *FP6* Европейской комиссии (2004...2009 гг.) было не менее 10 проектов, напрямую посвященных различным аспектам построения B2B-сетей. Среди них наиболее заметным был проект *ATHENA IP* [2] этой программы, в котором исследовались различные аспекты создания *инфраструктуры* и средств поддержки процессов функционирования производственных B2B-сетей с акцентом на *совместимость* моделей данных разных компаний, т. е. на способность двух узлов сети обмениваться информацией и использовать ее в своих целях. В проекте были также определены базовые требования к модели инфраструктуры для поддержки распределенного взаимодействия предприятий и сформулированы основные проблемы создания типовой программно-коммуникационной инфраструктуры для интеграции бизнес-процессов сети.

Развитию концепции сетевого бизнеса были посвящены и другие проекты программы *FP6*, например, *FLUID-WIN*, *INTEROP*, *ABILITIES*, *SATINE*, *TRUSTCOM* и др. С ними можно познакомиться на веб-сайте программы [8].

Важным результатом выполнения этих проектов стало создание европейского консорциума "*Future Internet Enterprise Systems (FIeS) Cluster*", который объединил участников некоторых из названных выше проектов в рамках проекта программы *FP7* с акронимом *COIN* — "*COllaboration and INteroperability for networked enterprises*" [9]. Этот проект сформулировал цели, формы и результаты, которые должны быть достигнуты европейской промышленностью к 2020 году. Эти результаты были положены в основу программы развития европейской производственной сети в соответствии с программой *Horizon 2020* [10]. Они изложены в документе "*Future Internet Enterprise Systems (FIeS): Research Roadmap 2025*" [11] ("Будущие веб-системы управления предприятиями: Дорожная карта исследований до 2025 года"). Эта дорожная карта формулирует

цели и задачи развития информационно-коммуникационных систем поддержки сетевой организации европейского бизнеса в модели В2В-сети предприятий до 2025 г.

В последующих программах Европейской комиссии, а именно, в программах *FP7* и *Horizon 2020* насчитывается уже более 20 проектов, которые сосредоточены на исследованиях и разработках, имеющих целью реализацию задач, поставленных в дорожной карте [11], и их дальнейшее углубление.

Вне Европы современным прототипом будущих В2В-сетей является китайская В2В-сеть транспортной логистики *JCtrans.Net* [12]. Эта сеть поддерживает совместный онлайн-бизнес свыше 30 000 компаний из 200 стран в области транспортной логистики. Ее актуальная база данных содержит информацию о грузах разных категорий с их детальным описанием, о компаниях, о ценах и пр. Она поддерживает формирование бизнес-процессов и кооперации различных компаний при выполнении сложных грузоперевозок по всему миру с привязкой их ко времени и к реальным возможностям компаний в конкретные периоды времени.

Но таких свойств и возможностей, тем не менее, недостаточно с позиций современной концепции В2В-сети. В частности, в сети *JCtrans.Net* отсутствует возможность прямого взаимодействия партнеров по бизнесу, выполняющих общий бизнес-процесс, слабо решаются вопросы синхронизации расписаний выполнения заказов на перевозку грузов, недостаточен уровень автоматизации процессов формирования сложных логистических цепочек и др. Кроме того, эта инфраструктура является специализированной, поэтому она не может быть напрямую использована в другом типе бизнеса, например, в производственной В2В-сети, а именно такие сети находятся в настоящее время в центре внимания исследователей и разработчиков новых концепций, моделей и архитектур распределенного бизнеса в концепции цифровой экономики.

Работы по развитию В2В-технологий для бизнеса в России пока практически отсутствуют. По крайней мере, вопрос об исследованиях и разработках в интересах создания полномасштабных самоорганизующихся сетей предприятий пока не обсуждается в доступной литературе. Такие работы только планируются разворачивать в рамках проектов Национальной технологической инициативы [13].

Данная работа опирается на концепцию развития производственной В2В-сети, сформулированную в работе [11]. Ее цель состоит, в первую очередь, в поиске решений для ключевых проблем и вызовов в области В2В-сетей, в частности, для создания концептуальных и архитектурных решений, необходимых для практической реализации идеи открытых В2В-сетей на основе принципов самоорганизации. Это может быть достигнуто решением следующих задач:

1) создание модели открытой самоорганизующейся В2В-сети и программно-коммуникацион-

ной инфраструктуры, необходимой для поддержки распределенного взаимодействия ее узлов;

2) разработка алгоритмов распределенного планирования исполнения распределенных бизнес-процессов, например, на основе рыночного механизма самоорганизации;

3) разработка алгоритмов распределенной координации расписаний работы узлов В2В-сети, совместно выполняющих множество бизнес-процессов (заказов на производство продукции или заявок на поставку сервисов), поступающих в произвольные узлы сети в темпе реального времени.

2. Понятие В2В-сети и ее концептуальная архитектура

Общепринятого определения понятия В2В-сети не существует. 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*. Последнее замечание означает, что пользователь конечного продукта, производимого бизнес-процессом, в этой сети, как правило, отсутствует. Содержательно этот термин описывает область экономических взаимодействий компаний между собой.

В2В-системы развивались от простых корпоративных сайтов компаний, интернет-магазинов и служб закупок и снабжения к информационным и брокерским сайтам. Корпоративные сайты уже играли роль относительно простых (по современным меркам) программно-информационных инфраструктур для поддержки В2В-бизнеса. Например, такие информационные сайты использовались для размещения информации о целой отрасли, о входящих в нее компаниях, параметрах состояния рынка и об отраслевых стандартах. На следующем этапе развития инфраструктур для поддержки В2В-бизнеса появились брокерские сайты, которые предоставляли сервис посредничества между производителями и потребителями продуктов и услуг в области бизнеса. Повышение уровня автоматизации брокерских сайтов и расширение множества предоставляемых ими сервисов привело к появлению электронных торговых площадок, предназначенных для автоматизации функций посредничества для производителей и потребителей товаров.

Именно такой упрощенный вид В2В-бизнеса, главным образом, используется в России и в настоящее время. Эти В2В-площадки обычно ориентированы на продавцов и покупателей сразу и создаются на базе центрального портала. По архитектуре и решаемым задачам они достаточно далеки от того, что планируется создать в рамках Дорожной карты [11].

В современной трактовке производственная В2В-сеть понимается как территориально распе-

деленная сеть предприятий, способных выполнять какое-то множество специализированных видов работ по производству тех или иных продуктов или поставлять какие-то сервисы. Обычно в такой сети технологические возможности предприятий взаимно дополняют друг друга. Поэтому они заинтересованы в кооперации при производстве сложных изделий или поставке сложных сервисов, тем более, что итоговая стоимость конечного продукта оказывается в этом случае дешевле за счет специализации, использования более дешевой рабочей силы и возможного снижения транспортных расходов.

В данной работе предполагается, что заказы, например, на производство каких-то материальных продуктов, транспортировку, сборку сложных изделий, на поставку сервисов и т. п. могут поступать в сеть из внешней среды в любой ее узел, а также могут порождаться самими узлами сети. Термин *заказ* обозначает задание на производство некоторого, возможно, сложного продукта или поставку сложного сервиса. Полагается, что у заказа есть конкретный заказчик, и он же является потребителем результата. Выполнение каждого заказа реализуется *бизнес-процессом* — частично-упорядоченным множеством работ¹, каждая из которых требует определенных технологических компетенций, адекватных технических, человеческих, временных и других ресурсов, которыми должно обладать предприятие-исполнитель (узел сети), готовое взяться за выполнение всего заказа, или такими возможностями должны обладать предприятия, вовлеченные в кооперативное исполнение заказа.

B2B-сеть должна решать следующие задачи, связанные с поддержанием процесса ее функционирования и решением ее целевых задач:

1. *Управление планированием.* Под планированием понимается распределение частей заказа по узлам-исполнителям. Планирование выполняется в соответствии с некоторой политикой, принятой в сети. Целью данной задачи является назначение частей заказа конкретным исполнителям. Она решается с использованием механизма планирования и некоторой политики оптимизации/координации, принятыми в B2B-сети. При этом обычно во внимание приходится принимать большое число разнообразных факторов, связанных не только с техническими и ресурсными возможностями отдельных узлов-предприятий, но и с их загруженностью другими заказами, репутацией потенциальных исполнителей в глазах заказчика или узла, управляющего решением задачи планирования, и другими факторами, которые являются атрибутами (входными данными) механизма принятия решений.

2. *Управление составлением расписаний.* Под этим подразумевается составление распределенного расписания выполнения отдельных заказов и их компонентов, удовлетворяющего ресурсным ограни-

чениям узлов-исполнителей и временным ограничениям на самые поздние сроки выполнения заказов, исполняемых в сети. Последнее может формулироваться в виде показателя качества, например, использующего штрафные функции за задержку выполнения заказов, исполняемых B2B-сетью. Поскольку каждый узел может выполнять несколько заказов одновременно, а конкретный заказ может выполняться параллельно и/или последовательно несколькими узлами сети, то принципиально новой проблемой составления расписаний является координация расписаний узлов сети по показателю качества, отражающему глобальные характеристики сети в целом, а также локальные показатели качества на уровне отдельных узлов. В настоящее время эта задача *на практике* не решается, и ее алгоритмизация относится к одному из серьезных вызовов производственной B2B-сети.

3. *Инфраструктурные задачи.* Под инфраструктурными задачами понимают множество вспомогательных задач, которые необходимо решать для поддержки функций взаимодействия узлов (предприятий) B2B-сети. К таким задачам относятся, в частности:

- обеспечение *коммуникационного сервиса* узлам сети, необходимого для обмена информацией между ее узлами, например, в форме сообщений, как это реализуется в современных вариантах многоагентной архитектуры B2B-сети, и в любой другой сервис-ориентированной архитектуре;
- обеспечение *информационной совместимости* предприятий, необходимой для их интеграции при выполнении ими общих бизнес-процессов. Напомним, что это требование относится к главным требованиям Дорожной карты [11] Европейской комиссии;
- *поддержка множества протоколов взаимодействия* узлов сети в различных случаях использования (англ. *use cases*) и конкретных сценариях их реализации. Примерами являются, например, протоколы распределенного планирования и координации расписаний выполнения общих бизнес-процессов. Отдельный класс образуют протоколы для реализации механизмов *самоорганизации*, например механизма аукциона, который является востребованным при решении задач планирования заказов;
- *поддержка открытости сети*, в которой в любой момент времени любой ее узел может покинуть сеть, и наоборот, новые узлы могут присоединяться к сети и далее использовать ее сервисы, а также предоставлять свои сервисы, следуя протоколам, принятым в сети. Обычно открытость сети поддерживается сервисами распределенных "белых" и "желтых" страниц. Централизованное управление в открытой сети невозможно.

Естественно, что содержание задач планирования и составления расписаний, а также детали протоколов их координации будут различными для разных видов бизнес-процессов. Для того чтобы можно было абстрагироваться от деталей различ-

¹ Содержательно отношение порядка задает ограничения на допустимый порядок выполнения некоторых операций, работ, предусмотренных принятой технологией выполнения заказа.

ных бизнес-процессов, в данной работе они рассматриваются на таком уровне общности, на котором эти детали оказываются несущественными. При таком подходе появляется возможность построить типовую модель функционирования узла сети и ядро программной реализации информационно-коммуникационной инфраструктуры, поддерживающей работу В2В-сети, в виде компонентов повторного использования, пригодных для применения в широком классе бизнес-приложений.

Тем не менее, хотя в работе рассматривается достаточно общая постановка задачи построения типовой модели функционирования узла сети и ядра информационно-коммуникационной инфраструктуры, в дальнейшем материале, приведенном во второй части работы, предлагаемые модели, архитектура, алгоритмы функционирования В2В-сети и ее компонентов (узлов) рассматриваются на примере производственной сети. Этот выбор объясняется тем, что, во-первых, основной направленностью данной работы является анализ базовых задач, принципов построения и алгоритмов функционирования производственных В2В-сетей, создание которых в настоящее время рассматривается как один из важных путей трансформации современной экономики к ее цифровой модели. Во-вторых, в этом направлении уже проведен достаточно большой объем предварительных исследований и разработок, причем дорожные карты продвижения в жизнь В2В-моделей бизнеса, разработанные в Европе, Азии и в США, в значительной мере ориентированы на развитие именно производственных В2В-сетей. Кроме того, у авторов данной работы имеется практический опыт исследований и разработок в этой области [14–16], что позволяет глубже понять существо проблемы и оценить возможные методы решения задач создания производственных В2В-сетей.

Заключение

В первой части работы рассмотрена сетевая концепция ведения распределенного бизнеса, которую в современной терминологии принято называть В2В-сетью. В настоящее время эта концепция рассматривается ведущими странами Европы, Америки и Азии как глобальная будущая перспектива развития, организации и управления бизнес-процессами в производственной сфере, в логистике и обеспечении веб-сервисами.

Применительно к производственным сетям в этой концепции в качестве узлов В2В-сети выступают конкретные территориально распределенные производственные предприятия, которые кооперируются при совместном выполнении распределенных бизнес-процессов по производству сложной продукции. При этом В2В-сеть понимается как территориально распределенная сеть предприятий, каждое из которых способно выполнять какое-то множество специализированных видов работ по производству тех или иных продуктов или

обеспечивать поставку тех или иных сервисов. В этой сети полагается, что технологические возможности узлов сети взаимно дополняют друг друга, так что они заинтересованы в кооперации при производстве сложной продукции и/или при поставке сложных сервисов.

В работе сформулированы базовые задачи, которые должны решаться на уровне сети в целом, а также локальные задачи, решаемые в узлах сети. Для этих задач предложены модели концептуального уровня. В частности, такие модели предложены для инфраструктурной компоненты В2В-сети, которая должна решать множество вспомогательных задач, необходимых для поддержки функций взаимодействия узлов В2В-сети. К ним относятся обеспечение коммуникационного сервиса для узлов сети, поддержание информационной совместимости предприятий, что является основой для интеграции их бизнес-процессов, поддержка открытости сети, в соответствии с которой в любой момент времени любой ее узел может покинуть сеть, и наоборот — новые узлы на равноправной основе могут присоединяться к сети.

Далее во второй части работы для каждой из этих инфраструктурных задач предлагаются пути их решения на алгоритмическом уровне, и на основании имеющегося опыта анализируются варианты их программной реализации.

Список литературы

1. **Legner C., Wende K.** The Challenges of Inter-Organizational Business Process Design — A Research Agenda // European Conference on Information Systems (ECIS 2007), June 7–9 2007. 2007. P. 1643–1654.
2. **ATHEN-AP.** Advanced Technologies for interoperability of Enterprise Networks. URL: <http://www.athena-ip.org/> (дата обращения: 30.01.2017).
3. **Mendling J., and M. Nüttgens.** XML-based Reference Modeling: Foundations of an EPC Markup Language // Proc. of the 8th GI Workshop Referenzmodellierung 2004 at MKWI. P. 51–72.
4. **Zanet M.** et al. Platform Design for the B2B Approach. Enterprise Interoperability III. Springer, 2008. P. 25–133.
5. **RosettaNet.** URL: www.rosettanet.org (дата обращения: 30.01.2017).
6. **Viswanadham N., Gaonkar R.** E-Logistics- Trends and Opportunities. The Logistic Institute- Asia Pacific. Logistics Management. Vol. 1. ICFAI Press, India.
7. **JCtrans.net** — Its Functions & Services. URL: <http://slideplayer.com/slide/8275897/> (дата обращения: 30.01.2017).
8. **Европейская** программа FP6. URL: <http://cordis.europa.eu/fp6> (дата обращения: 30.01.2017).
9. **COIN** — "COllaboration and INteroperability for networked enterprises". URL: http://cordis.europa.eu/project/rcn/85550_en.html (дата обращения: 30.01.2017).
10. **Horizon** 2020. URL: <http://fp7-nip.org.by/ru/hor20/news/be914e8caf22b1e1.html> (дата обращения: 30.01.2017).
11. **Future Internet Enterprise Systems (FIeS): Research Roadmap 2025.** URL: http://cordis.europa.eu/fp7/ict/enet/documents/fines-research-roadmap-v30_en.pdf (дата обращения: 30.01.2017).
12. **JCtrans.Net.** URL: <http://www.jctrans.net> (дата обращения: 30.01.2017).
13. **Национальная** технологическая инициатива России. URL: <http://asi.ru/nti/> (дата обращения: 10.08.2017).
14. **Бухвалов О. Л., Вылегжанин А. С., Городецкий В. И., Карсаев О. В., Кудрявцев Г. И., Самойлов В. В.** Стратегическое планирование и управление конфликтами в производственных системах с высокой динамикой заказов // Труды VII Немец-

ко-Российской конференции по логистике и управлению в сетях поставок. Санкт-Петербург, 16–19 мая 2012 г. С. 381–388.

15. 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, № 3 Март 2012, С. 209–218.

16. Bukhvalov O., Gorodetsky V., Karsaev O., Koudryavtsev G., Samoylov V. Privacy-Preserved Distributed Coordination of Production Scheduling in B2B Networks: A Multiagent Approach // Proc. 7th IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management, and Control. 2013. Vol. 7. Part 1. P. 2122–2127.

Self-Organized B2B Production Networks. Part I. Concept and Basic Tasks

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., St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, Address 39, 14-th Liniya, St. Petersburg, 199178, Russian Federation
e-mail: gor@iias.spb.su

Accepted on August 14, 2017

Network-centric business implemented via open self-organizing B2B production network is a relatively novel concept of global business organization that has become the subject of the active research and development during the last decade. In the developed countries, this paradigm is considered as a new very promising future model of distributed business and virtual organizations. The paper analyzes the state-of-the-art in this field, formulates its key problems and challenges and proposes, for B2B production network, an open self-organized multi-agent architecture. It describes and justifies the proposed basic models designed to solve the key B2B production network applied tasks. Among them, it outlines panning task that is allocation of particular components of a completely distributed business process to particular network nodes to execute, and distributed coordination of local schedules of the network nodes solving the allocated subtasks of the shared business processes. The significant attention is also paid to the description of the developed model of the software infrastructure intended to support network node communications and interactions in ad-hoc (p2p) manner. The fundamental role of self-organization as the basis of the B2B-open network applied and infrastructural functionalities is emphasized. The B2B production network is considered as a basic class of applications that best fits great potential of self-organized B2B network as a distributed production model.

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 # 1.5 of the Russian Academy of Sciences.

For citation:

Gorodetsky V. I., Bukhvalov O. L. Self-Organized B2B Production Networks. Part I. Concept and Basic Tasks, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 776–781.

DOI: 10.17587/mau.18.776-781

References

1. Legner C., Wende K. et al. The Challenges of Inter-Organizational Business Process Design — A Research Agenda, *European Conference on Information Systems (ECIS 2007)*, June 7–9 2007, pp. 1643–1654, available at: http://works.bepress.com/hubert_oesterle/172 (date of access: 30.01.2017).
2. ATHEN-AP. Advanced Technologies for interoperability of Enterprise Networks, available at: <https://www.westyorkshire.police.uk/athena> (date of access: 30.01.2017).
3. Mendling J., Nüttgens M. XML-based Reference Modeling: Foundations of an EPC Markup Language, *Proc. of the 8th GI Workshop Referenzmodellierung 2004 at MKWI*, pp. 51–72.
4. Zanet M. et al. Platform Design for the (B2B) Approach. Enterprise Interoperability III, Springer, 2008, pp. 25–133.
5. RosettaNet, available at: www.rosettanet.org (date of access: 30.01.2017).
6. Viswanadham N., Gaonkar R. E-Logistics- Trends and Opportunities, *The Logistic Institute-Asia Pacific, Logistics Management*, vol. 1, ICAFI Press, India, 2012.
7. JCTrans.net — Its Functions & Services, available at: <http://slideplayer.com/slide/8275897/> (date of access: 30.01.2017).

8. European Commission Sixth Framework Program (FP6), available at: <http://cordis.europa.eu/fp6> (date of access: 30.01.2017).
9. COIN — "Collaboration and Interoperability for networked enterprises, available at: http://cordis.europa.eu/project/rcn/85550_en.html (date of access: 30.01.2017)
10. Horizon 2020, available at: <http://fp7-nip.org.by/ru/hor20/news/be914e8caf22b1e1.html> (date of access: 30.01.2017).
11. Future Internet Enterprise Systems (FinES): Research Roadmap 2025, available at: http://cordis.europa.eu/fp7/ict/enet/documents/fines-research-roadmap-v30_en.pdf (date of access: 30.01.2017).
12. JCTrans.Net, available at: <http://www.jctrans.net> (date of access: 30.01.2017).
13. Natsionalnaya Technologicheskaya Initsiativa Rossii (National Technological Initiative of Russia), available at: <http://asi.ru/nti/> (date of access: 10.08.2017) (in Russian).
14. Bukhvalov O., Vylegzhanin A., Gorodetsky V., Karsaev O., Koudriatsev G., Samoylov V. Strategicheskoe planirovanie i upravlenie konfliktami v proizvodstvennykh sistemakh s vysokoi dinamiko zakazov (Strategic Planning and Conflict Management in Production Systems of High Dynamics of Orders), In *Proceedings of VII Russian-German Conference on Logistics and Supply Chain Control (DR-LOG 2012)*, St. Petersburg, May 16–17 2012, pp. 381–388 (in Russian).
15. Bukhvalov O., Gorodetsky V., Karsaev O., Koudriavtsev G., Samoylov V. Proizvodstvennaya logistika: Strategicheskoe planirovanie, prognozirovaniye b upravleniye konfliktami (Production Logistics: Strategic Planning and Conflict Management), *Transactions of South Federal University*, 2012, no. 3, March, pp. 209–218 (in Russian).
16. 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, vol. 7, part 1, pp. 2122–2127.

А. С. Девятисильный^{1, 2}, д-р техн. наук, проф., devyatis@iacp.dvo.ru,

А. В. Шурыгин^{1, 2}, мл. науч. сотр., artem.shurygin@bunjlabs.com,

А. К. Стоценко¹, мл. науч. сотр., stotsenko@iacp.dvo.ru,

¹Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,

²Дальневосточный федеральный университет

Аналитическое конструирование и численное исследование моделей определения движения на данных ГЛОНАСС

Рассматривается проблема расширения функций ГЛОНАСС в целях оценки возможности определения производных координат местоположения подвижного объекта. Разработана математическая модель соответствующей обратной траекторной задачи, изложена технология, выполнено исследование и предложены процедуры для повышения разрешимости задачи в условиях конечной точности измерения и представления чисел в вычислительной среде. Предложен нейророботный алгоритм решения задачи калмановского типа. Представлены результаты вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: движение, скорость, обратная траекторная задача, нейророботный алгоритм, навигационная спутниковая система, ГЛОНАСС

Введение

Разнообразная и интенсивная деятельность человечества на море и в околоземном пространстве (коммерческая навигация и решение вопросов оборонного значения, гидрографические и геофизические исследования, разведка полезных ископаемых и т. п.) может быть обеспечена только при условии высококачественного решения базовой задачи навигации — определения параметров движения, т. е. местоположения объекта навигации, его скорости, реже ускорения, а еще реже рывка. Немаловажным является и то, что знание параметров движения необходимо при оценке динамических и конструктивных характеристик подвижных объектов в процессе их ходовых испытаний и эксплуатации.

Выдающимся достижением в области навигационного обеспечения движения явилось создание первых низкоорбитальных навигационных спутниковых систем (НСС) в 60-е годы двадцатого столетия (Transit — США, Циклон — СССР). В нынешнем двадцатом первом столетии наиболее широкое применение нашли среднеорбитальные НСС (типа GPS — США, ГЛОНАСС — Россия). В таких НСС для определения параметров траектории подвижного объекта могут быть реализованы различные методы [1], но в качестве базового справедливо было бы указать псевдодальномерный метод (дополненный, безусловно, известными методологиями компенсации погрешностей, вносимых источниками различной природы), весьма эффективно решающий проблему прецизионного оценивания координат местоположения объекта. В настоящей статье рассматриваются именно координаты места

объекта в качестве исходной информации при конструировании бортовых (на объекте) алгоритмов оценивания других параметров траектории, из числа которых важнейшим является вектор скорости объекта относительно твердой Земли.

Основные модельные представления

Прежде всего, учитывая, что речь идет о навигации объектов в околоземном пространстве, причем главным образом о морских объектах и мало-высотных объектах морского базирования, в качестве опорной модели формы Земли естественно принять эллипсоид вращения (эллипсоид Клеро) с поверхностью (называемой уровневной), ортогональной направлению силы тяжести на спокойной поверхности Океана [2]. Соответственно этому введем эллиптическую (или геодезическую) систему отсчета с координатами $\{\tilde{\varphi}, \tilde{\lambda}, h\}$, где $\tilde{\varphi}$ и $\tilde{\lambda}$ — широта и долгота (от Гринвича) местоположения объекта, а h — расстояние по нормам от поверхности эллипсоида [2]. С подвижной точкой O_1 , отождествляемой с подвижным объектом, свяжем декартову систему координат $O_1 \tilde{\xi}_1 \tilde{\xi}_2 \tilde{\xi}_3 = O_1 \tilde{\xi}$ с осями, ориентированными соответственно на Восток ($O_1 \tilde{\xi}_1$), Север ($O_1 \tilde{\xi}_2$), по нормали к поверхности эллипсоида ($O_1 \tilde{\xi}_3$). Введем также геоцентрическую систему отсчета $O\eta = O\eta_1\eta_2\eta_3$ (в системе ГЛОНАСС определяемую как ПЗ-90, а в системе GPS — как WGS-84 [1]) с началом в точке O (центр Земли), декартовыми координатами $\{\eta_1, \eta_2, \eta_3\}$ и сферическими координатами $\{\varphi, \lambda, r\}$, где φ и λ — соответственно широта и долгота (от Гринвича) местоположения объекта, r — радиус точки $\{\eta_1, \eta_2, \eta_3\}$, т. е.

длина отрезка OO_1 . Связь между координатами $\{\varphi, \lambda, r\}$ и $\{\tilde{\varphi}, \tilde{\lambda}, h\}$ известна, а именно [2]:

$$\begin{aligned}\lambda &= \tilde{\lambda}; \\ \operatorname{tg} \varphi &= \left[1 - \frac{ae}{a + h\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \tilde{\varphi}}} \right] \operatorname{tg} \tilde{\varphi}; \\ r &= \left\{ \left[\frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \tilde{\varphi}}} + h \right]^2 \cos^2 \tilde{\varphi} + \right. \\ &\quad \left. + \left[\frac{a(1 - e^2)}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \tilde{\varphi}}} + h \right]^2 \sin^2 \tilde{\varphi} \right\}^{1/2}.\end{aligned}$$

Здесь a — большая полуось Земли; e^2 — первый эксцентриситет эллипсоида Клеро [2].

С подвижной точкой O_1 свяжем еще одну декартову систему координат $O_1 \xi_1 \xi_2 \xi_3 = O_1 \tilde{\xi}$ с осями, ориентированными соответственно на Восток ($O_1 \tilde{\xi}_1$), Север ($O_1 \tilde{\xi}_2$), по радиус-вектору точки $\{\eta_1, \eta_2, \eta_3\}$, т. е. $O_1 \tilde{\xi}_3$. Имеет место следующее ортогональное преобразование [2]:

$$\begin{aligned}\tilde{\xi}_1 &= \xi_1; \\ \tilde{\xi}_2 &= \cos(\tilde{\varphi} - \varphi) \xi_2 - \sin(\tilde{\varphi} - \varphi) \xi_3; \\ \tilde{\xi}_3 &= \sin(\tilde{\varphi} - \varphi) \xi_2 + \cos(\tilde{\varphi} - \varphi) \xi_3.\end{aligned}$$

С учетом изложенного выше отметим, что, вообще говоря, все равно, в какой из связанных с Землей систем отсчета решать навигационную задачу. Вместе с тем, результат интерпретации ее решения неизбежно потребует более внимательного отношения к этой несложной проблеме. Например, если, в конечном итоге, обсуждаются скорости морских течений, то, очевидно, они должны быть представлены в касательных плоскостях эллипсоида.

Перейдем к модели траектории. Обратимся к подвижной системе отсчета $O_1 \tilde{\xi}$. В проекции на ее оси вектор линейной скорости объекта относительно твердой Земли, т. е. $V = (V_1, V_2, V_3)^T$, определяется следующим образом: $V_i = e_{ikj} \omega_k r_j + r_i$, $(i, j, k) = \overline{1, 3}$, где e_{ikj} — псевдотензор Леви—Чивиты; $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$ — вектор угловой скорости вращения трехгранника $O_1 \tilde{\xi}$ в проекциях на собственные оси; $\omega_1 = -\dot{\varphi}$, $\omega_2 = \dot{\lambda} \cos \varphi$, $\omega_3 = \dot{\lambda} \sin \varphi$; $r = (0, 0, r_3)^T$ — вектор местоположения объекта в проекциях на оси трехгранника $O \tilde{\xi}$. Тогда $\dot{\varphi} = V_2/r$, $\dot{\lambda} = V_1/r \cos \varphi$, $\dot{r}_3 = V_3$. Отождествляя теперь покоординатные составляющие скорости с полиномиальными степени $n - 2$ функциями времени, определенными на интервале, вообще говоря, произвольной длины τ , модель эволюции геодезических сферических координат объекта можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1^{(i)} &= \rho^{(i)} x_2^{(i)}; x_1^{(i)}(t_0) = x_{1,0}^{(i)}; \\ \dot{x}_2^{(i)} &= x_3^{(i)}; x_2^{(i)}(t_0) = x_{2,0}^{(i)}; \\ &\dots \\ \dot{x}_n^{(i)} &= 0; x_n^{(i)}(t_0) = x_{n,0}^{(i)}\end{aligned}$$

или в общем виде:

$$\dot{x}^{(i)} = A^{(i)} x^{(i)}; x^{(i)}(0) = x_0^{(i)}; i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где индексы $i = 1, 2, 3$ кодируют процессы, соответствующие $\varphi(t)$, $\lambda(t)$, $r(t)$, $t \in [t_0, t_0 + \tau]$:

$$\begin{aligned}x_1^{(1)} &= \varphi, x_1^{(2)} = \lambda, x_1^{(3)} = r; \\ x_2^{(1)} &= V_2, x_2^{(2)} = V_1, x_3^{(3)} = V_3 \text{ и т. д.}; \\ \rho^{(1)} &= 1/r, \rho^{(2)} = -1/r \cos \varphi, \rho^{(3)} = 1.\end{aligned}$$

Полагая, что НСС доставляет потребителю (объекту) информацию в виде оценок его координат (φ, λ, r) , будем интерпретировать эти оценки как измерения, т. е. $z^{(i)} = x_1^{(i)} + \varepsilon^{(i)}$, или

$$z^{(i)} = Hx^{(i)} + \varepsilon^{(i)}, i = \overline{1, 3}, \quad (2)$$

где $\varepsilon^{(i)}$ — погрешности оценок; $H = (1, 0, 0)$.

Легко видеть, что совокупность уравнений (1) и (2) может рассматриваться в качестве совокупности трех схожих обратных задач типа "состояния — измерения", целью решения которых являются оценки векторов $x^{(i)}$, причем прежде всего их компонент $x_2^{(i)}$, т. е. составляющих вектора V скорости объекта.

Учитывая отмеченную схожесть задач, далее будем обсуждать только одну из них (как типовую с $i = 1$), опуская в ее записи индекс, т. е. задачу

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax; x(0) = x_0; \\ z &= Hx + \varepsilon; \dim x = n.\end{aligned} \quad (3)$$

Матрица A нильпотентна с индексом $q = n$, т. е. $A^n = 0$; она имеет $n - 1$ отличных от нуля элементов, а именно $A_{1,2} = \rho$ и $A_{i,j} = 1$ при $i > 1$ и $j = i + 1$.

При численном решении сформулированной обратной задачи требуется обращение к дискретной модификации модели (3), которую, с учетом сказанного выше о матрице A , на интервале времени $[t_k, t_{k+1}]$, $t_{k+1} - t_k = \tau = \text{const}$, $k = 0, 1, 2, \dots$, можно записать в виде

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= \Phi_k(\tau) x_k; \\ z_{k+1} &= H_{k+1} x_{k+1} + \varepsilon_{k+1},\end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= \Phi_k(\tau) x_k; \\ z_{k+1} &= H_{p,k+1} x_k + \varepsilon_{k+1},\end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned}\Phi_k(\tau) &= \begin{pmatrix} 1 & \rho\tau & \frac{\rho^2\tau^2}{2!} & \dots & \frac{\rho\tau^{n-2}}{(n-2)!} & \frac{\rho\tau^{n-1}}{(n-1)!} \\ 0 & 1 & \tau & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ H_{k+1} &= H = (1, 0, \dots, 0),\end{aligned}$$

$$H_{p,k+1} = H_{k+1} \Phi_k(\tau) = \left(1, \rho\tau, \frac{\rho^2\tau^2}{2}, \dots, \frac{\rho\tau^{n-1}}{(n-1)!} \right).$$

Представление (4) является точным по отношению к (3), если $\rho = \text{const}$, и тем точнее, чем меньше τ , если $\rho = \rho(i)$; вместе с этим следует особо отметить, что с уменьшением τ неизбежно ухудшение разрешимости обратной задачи (по Адамару) в условиях конечной точности измерений и вычислений. Изменить ситуацию к лучшему можно, вводя процедуры преобразования переменных, приводящие к формам, не зависящим от ρ и τ .

Здесь рассматриваются две такие процедуры (соответственно, два метода, две методологии, две технологии) — одноэтапная и двухэтапная.

Одноэтапная процедура выполняется в следующей последовательности:

1. Форматируется матрица наблюдаемости N_p для пары $(H_p, \Phi(\tau))$ модели (4).

2. Определяются евклидовы нормы $\|N_{p,i}\|$ столбцов $N_{p,i}$ ($i = \overline{1, n}$) матрицы N_p .

3. Формируется диагональная матрица $D_p = \text{diag}(\|N_{p,1}\|, \dots, \|N_{p,n}\|)$ — матрица преобразования переменных $\tilde{x} = D_p x$.

4. Модель (4) приводится к форме

$$\tilde{x}_{k+1} = \tilde{\Phi}_k \tilde{x}_k;$$

$$z_{k+1} = \tilde{H}_k \tilde{x}_k + \varepsilon_{k+1}, \quad (5)$$

где $\tilde{\Phi}_k = D \Phi_k(\tau) D^{-1}$, $\tilde{H}_k = H_{p,k} D^{-1}$.

5. Сравниваются числа обусловленности матриц наблюдаемости исходной модели (4) и полученной модели (5), т. е. $\mu(N_p)$ и $\mu(N_{pN})$, где $N_{pN} = N_p D^{-1}$, и делаются выводы о рассмотренном преобразовании переменных.

Двухэтапная процедура учитывает особенность вида матрицы H_p . При изложении этой процедуры для наглядности примем $n = 5$. На первом этапе выполняются следующие шаги:

1. Модель (4) с помощью преобразования $f = D_f x$, где $D_f = \text{diag}(1, \rho\tau, \rho\tau^2/2, \rho\tau^3/3!, \rho\tau^4/4!)$, приводится к виду

$$f_{k+1} = \Phi_{f,k} f_k;$$

$$z_{k+1} = H_{f,k} f_k + \varepsilon_{k+1}, \quad (6)$$

где

$$\Phi_f = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & 3 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$H_f = (1, 1, 1, 1, 1).$$

Для пары (Φ_f, H_f) строится матрица наблюдаемости

$$N_f = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 8 & 16 \\ 1 & 3 & 9 & 27 & 81 \\ 1 & 4 & 16 & 64 & 256 \\ 1 & 5 & 25 & 125 & 625 \end{pmatrix}.$$

2. Оценивается сингулярное число обусловленности $\mu(N_f)$ и делается заключение о целесообразности решения обратной задачи (при заданном n) уже на этом этапе; здесь заметим, что матрицы Φ_f и N_f имеют специальный вид, а именно: матрица Φ_f является верхнетреугольной с целочисленными элементами $\Phi_{i,i} = 1$, $\Phi_{1,j} = 1$, $\Phi_{i+1,j+1} = \Phi_{i,j} + \Phi_{i+1,j}$, $(i,j) = \overline{1, n}$, $i \geq j$, а матрица N_f состоит из целочисленных элементов $N_{i,j} = i^{j-1}$, $(i,j) = \overline{1, n}$.

На втором этапе, если он оказывается необходим, выполняется еще одно преобразование переменных $S_k = D_s f$, где $D_s = \text{diag}(\|N_{f,1}\|, \|N_{f,2}\|, \dots, \|N_{f,n}\|)$, при котором матрица $N_f = N_s D_s$, где N_s — матрица с единичными нормами столбцов. Учитывая далее, что $N_p = N_f D_f = N_s D_s D_f$ и $D = D_s D_f$ (что легко проверяется), находим, что $N_s = N_{pN}$, т. е. $S_k = \tilde{x}_k$ и, таким образом, по сути, актуализируется модель (5).

Несмотря на то что конечный результат обеих процедур, как видим, одинаковый, вторая из них более продуктивна, когда речь идет об исследовании сепаратного влияния параметров (ρ, τ) и n ("проклятие размерности") на разрешимость рассматриваемой задачи. Заметим, что число этапов в поставленной задаче можно увеличить, если, например, в качестве первого преобразования взять преобразование с матрицей $D_p = \text{diag}(1, \rho, \dots, \rho)$. Наконец, возможны и экзотические процедуры, когда переменные преобразуются по-разному, если актуальны какие-либо системные представления, отличные от придерживаемых здесь.

Некоторые результаты исследования проблемы "проклятия размерности" будут представлены несколько ниже (см. таблицу).

Перейдем теперь к представлению алгоритма динамического обращения и остановимся на нейросетевой концепции [3], приняв за основу линей-

Числа обусловленности матриц наблюдаемости

n	$\frac{\mu(N_{p,\tau_1})}{\mu(N_{p,\tau_2})}$	$\frac{\mu(N_{pN,\tau_1})}{\mu(N_{pN,\tau_2})}$	$\frac{\mu(N_{f,\tau_1})}{\mu(N_{f,\tau_2})}$	$\frac{\mu(N_{s,\tau_1})}{\mu(N_{s,\tau_2})}$
2	$\frac{6,3710e+07}{1,2742e+07}$	$\frac{6,1623}{6,1623}$	$\frac{6,8541}{6,8541}$	$\frac{6,1623}{6,1623}$
3	$\frac{7,2795e+08}{6,0844e+07}$	$\frac{39,0077}{39,0077}$	$\frac{70,9231}{70,9231}$	$\frac{39,0077}{39,0077}$
4	$\frac{8,0047e+09}{2,2291e+08}$	$\frac{262,9437}{262,9437}$	$\frac{1,1710e+03}{1,1710e+03}$	$\frac{262,9437}{262,9437}$
5	$\frac{8,7781e+10}{7,4783e+08}$	$\frac{1,8524e+03}{1,8524e+03}$	$\frac{2,6170e+04}{2,6170e+04}$	$\frac{1,8524e+03}{1,8524e+03}$
10	$\frac{1,3968e+16}{2,4634e+11}$	$\frac{4,1966e+07}{4,1966e+07}$	$\frac{2,1063e+12}{2,1063e+12}$	$\frac{4,1966e+07}{4,1966e+07}$
19	$\frac{3,3225e+25}{1,0438e+16}$	$\frac{4,0542e+15}{4,0431e+15}$	$\frac{2,8640e+26}{5,1125e+24}$	$\frac{4,0793e+15}{4,0507e+15}$
20	$\frac{3,7743e+26}{7,5995e+16}$	$\frac{2,9984e+16}{3,0201e+16}$	$\frac{1,4788e+26}{3,3490e+26}$	$\frac{2,9904e+16}{3,0396e+16}$

ный динамический алгоритм (согласованный с моделями (4) и (5)) следующего вида:

$$y_{k+1} = C_k y_k + K z_{k+1};$$

$$y(0) = y_0,$$

где y_k — оценка вектора $\tilde{x}_k$, $x_k^* = D_p^{-1} y_k$ — оценка вектора x_k ; $C_k = \tilde{\Phi}_k - K_k \tilde{H}_k$; $K_k = (K_1, \dots, K_n)_k^T$ — матрица (вектор) синаптических коэффициентов, настраиваемых так, чтобы достигался минимум квадратического критерия $J_{k+1} = \|z_{k+1} - \tilde{H}_k x_k^*\|^2 + \|x_{2,k}^* - x_{2,k+1}^*\|^2 + \|x_{3,k}^* - x_{3,k+1}^*\|^2$ при обращении к ядерному механизму настройки [3], базирующегося на калмановской модели фильтрации [4], а именно:

$$K_{k+1} = \tilde{P}_{k+1} \tilde{H}_{k+1}^T [\tilde{H}_{k+1} \tilde{P}_{k+1} \tilde{H}_{k+1}^T + R_{k+1}]^{-1};$$

$$\tilde{P}_{k+1} = \tilde{\Phi}_k P_k \tilde{\Phi}_k^T + \tilde{Q}_k^*;$$

$$P_{k+1} = [E - K_{k+1} \tilde{H}_{k+1}] \tilde{P}_{k+1};$$

$$P(0) = P_0,$$

где E — единичная матрица; $(P_k, \tilde{P}_k)$ — матрицы, отождествляемые с дисперсионными (но, строго говоря, не являющиеся таковыми); R_k — положительно определенная матрица, отождествляемая с известной интенсивностью шумов измерения (в нашем случае — это заданная скалярная величина); $\tilde{Q}_{k+1}^* = \arg\min_Q J_{k+1}$, Q — положительная диагональная матрица.

Вычислительный эксперимент

Основная цель численных исследований — это верификация особенностей и эффективности представлений, изложенных выше.

Обратимся к таблице и отметим следующее: пробные реализации алгоритмов динамического обращения рассматриваемой обратной задачи в исходных (физических) переменных (модель (4)) показали их несостоятельность в используемой вычислительной среде с конечной относительной точностью ($E_0 = 2,2 \cdot 10^{-16}$) представления чисел, что объяснимо большими значениями чисел обусловленности матриц наблюдаемости ($\mu(N_p)$) при актуальных значениях $\tau \leq 1$. Преобразование переменных с неизбежностью приводит к новой модели задачи (5) со значительно лучшей ее обусловленностью ($\mu(N_{pN}) \ll \mu(N_p)$) и, как следствие, устойчивому и эффективному по точности ее решению (рис. 1—4). Вместе с тем, обращает на себя внимание и то, что сам процесс численного преобразования переменных и вычисления чисел обусловленности в среде с ограниченной точностью представ-

ления чисел в ней с ростом n приводит к заметным искажениям значений этих важнейших показателей разрешимости задачи ("проклятие размерности"), что хорошо видно по таблице при $n = 19$ и $n = 20$, когда нарушается очевидное из ранее изложенного свойство независимости нормированных матриц, а следовательно, и их чисел обусловленности $\mu(N_{pN})$, $\mu(N_p)$ и $\mu(N_s)$ от значений τ , а также равенство $\mu(N_{pN}) = \mu(N_s)$; в таблице $\tau_1 = 0,2$ с, $\tau_2 = 1$ с.

На рис. 1, 2 представлены некоторые результаты имитационного численного эксперимента при $n = 5$ и $\tau = 0,2$ с, проводимого для северной широты $\varphi = 45^\circ$ и скорости движения объекта $|V| = 100$ м/с. Наблюдаемое время движения объекта, $0 \leq t \leq 3600$, разбито на три подынтервала: на первом ($0 \leq t < 1000$) и третьем ($2080 < t \leq 3600$) объект движется прямым истинным курсом $\psi = 45^\circ$, на втором ($1000 \leq t \leq 2080$) — с рысканьем — $\psi = 45^\circ + 5^\circ \cos(2\pi t/T)$, $T = 300$ с. С достаточностью, обоснованной ранее, результаты эксперимента представляются только для северных элементов движения. Погрешность позиционирования ГЛОНАСС распределена равномерно на интервале $[-\sqrt{3}, \sqrt{3}]$, так что ее среднеквадратическое значение (СКП) $\sigma_\varepsilon = 1$ м. При этом СКП оценок, представленных на рисунках, имеют следующие значения: для положения — $\sigma_\varphi = 1,2 \cdot 10^{-8}^\circ$ (0,06 м); для скорости (V_2) на прямых

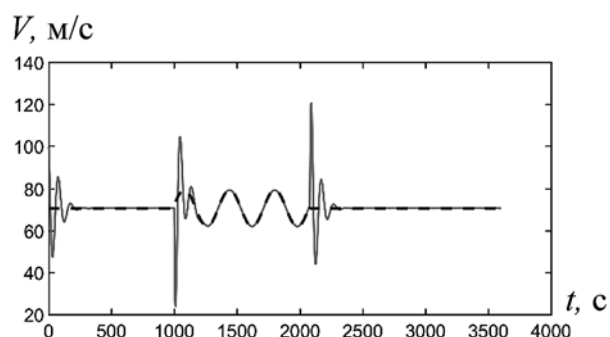


Рис. 1. Графики значений оценки (сплошная линия) и истинной (пунктирная линия) скорости V_2

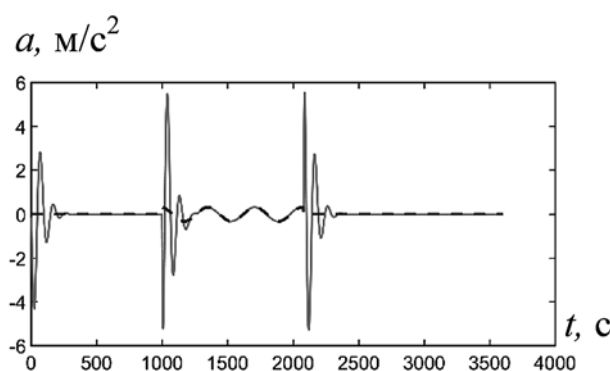


Рис. 2. Графики значений оценки (сплошная линия) и истинного (пунктирная линия) ускорения $a_2 = \dot{V}_2$

Таким образом, в статье представлены следующие результаты: разработана математическая (аналитическая) модель и ее компьютерный образ для численной оценки заданного n -го порядка измеряемой функции, отождествляемая с задачей оценки траекторных параметров движения объекта по данным его позиционирования ГЛОНАСС; разработана методология (технология) оценки разрешимости и обеспечения устойчивого решения навигационной задачи в условиях конечной точности представления чисел в вычислительной среде и погрешностей измерения; разработан нейророботный алгоритм калмановского типа для решения задачи; выполнена серия вычислительных экспериментов, результаты которых (часть из них представлена в статье) с достаточностью верифицируют и иллюстрируют эффективность предложенных методологий, моделей и алгоритмов.

Исследование рассчитано на применение в задачах управления движением, в частности, на автомобильном транспорте [5].

Список литературы

1. Перов А. И., Харисов В. Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М.: Радиотехника, 2005. С. 688.
2. Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации. Автоматные системы. М.: Наука, 1966. 580 с.
3. Девятисильный А. С. Модель нейросетевой инерциально-спутниковой навигационной системы с функцией оценки градиента напряженности гравитационного поля Земли // Журнал технической науки. 2016. Т. 86, № 9. С. 20—23.
4. Медич Дж. Статистические оптимальные линейные оценки и управление. М.: Энергия, 1972. С. 440.
5. Девятисильный А. С., Стоценко А. К. Исследование относительного продольного движения автомобилей в системе "лидер — ведомый" // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 4. С. 285—288.

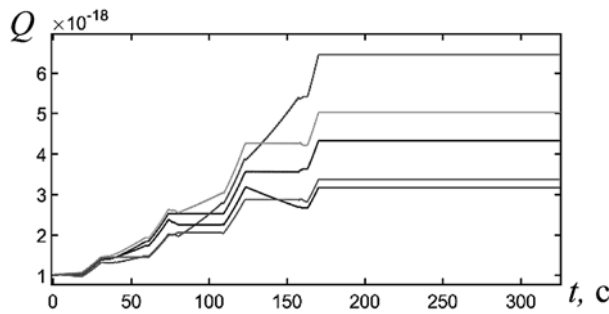


Рис. 3. Графики настройки элементов матрицы Q

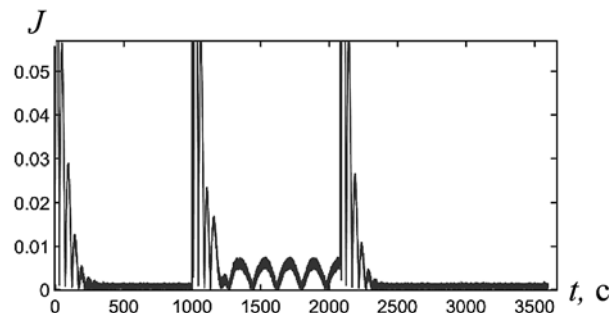


Рис. 4. График эволюции значений J

курсах $\sigma_v = 0,019$ м, при рыскании — $\sigma_v = 0,090$ м; для ускорения на прямых курсах $\sigma_a = 0,003$ м/с², при рыскании $\sigma_a = 0,01$ м/с².

На рис. 3 представлен процесс настройки элементов диагональной матрицы Q и на рис. 4 представлена эволюция функционала J . Настройка прекращена в момент времени $t = 168,8$ с, и далее алгоритм работает при постоянных значениях вектора синаптических коэффициентов $K = (9,19 \cdot 10^{-2}; 6,55 \cdot 10^{-3}; 2,26 \cdot 10^{-4}; 4,04 \cdot 10^{-6}; 3,2 \cdot 10^{-8})^T$.

Analytical Design and Numerical Research of Motion Detection Models Based on GLONASS Data

A. S. Devyatisilny^{1, 2}, devyatis@iacp.dvo.ru✉, A. V. Shurygin^{1, 2}, ashurygin@iacp.dvo.ru,
A. K. Stotsenko², stotsenko@iacp.dvo.ru,

¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690090, Russian Federation

²Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS,
Vladivostok, 690041, Russian Federation

Corresponding author: Devyatisilny Aleksandr S., Ph. D., Professor,
Head of the Navigation and Control Department, Institute of Automation and Control Processes
Far eastern Branch of RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation,
e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Accepted on August 17, 2017

The article is devoted to the problem of expanding the capabilities of onboard GLONASS. In GLONASS, the implementation of various methods is possible to determine the parameters of the object's trajectory. Pseudo-range method is supplemented with well-known error compensation methodologies. In particular, a two-frequency error determination method in-

roduced to compensate errors of radio signal passed through the ionosphere. This makes it possible to solve the problem of precise estimation of object's location coordinates very effectively. It is actual to consider the location coordinates as the initial information in the construction of onboard navigation algorithms for estimating other parameters of the trajectory, among which the most important is the velocity vector of the object relative to the Earth surface. The article presents a mathematical model of the inverse trajectory problem, the purpose of which is to evaluate object's location coordinates derivatives, described the used technology, research is carried out and procedures are proposed to improve the solvability of the problem under conditions of finite accuracy of measurements and representation of numbers in a computing environment. To solve the problem, a neural-like algorithm of the Kalman type is proposed. The results of computational experiments are also presented.

Keywords: motion, velocity, inverse trajectory problem, model, neural-like algorithm, navigation satellite system, GLONASS

For citation:

Devyatisilny A. S., Shurygin A. V., Stotsenko A. K. Analytical Design and Numerical Research of Motion Detection Models Based on GLONASS Data, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 782–787.

DOI: 10.17587/mau.18.782-787

References

1. **Perov A. I., Harisov V. N.** GLONASS. *Principy postroeniya i funkcionirovaniya* (GLONASS. Principles of construction and operation), Moscow, Radiotekhnika, 2005, 688 p. (in Russian).

2. **Andreev V. D.** *Teoriya inercial'noj navigacii. Avtonomnye sistemy* (The theory of inertial navigation. Autonomous systems) Moscow, Nauka, 1966, 580 p. (in Russian).

3. **Devyatisilny A. S.** Model' nejrosetevoj inercial'no-sputnikovoj navigacionnoj sistemy s funkciej ocenki gradienta napryazhennosti gravitacionnogo polya Zemli (Model of the neural network inertial-satellite navigation system with the function of estimating the gradient of the Earth's gravitational field strength), *Zhurnal Tekhnicheskoy Nauki*, 2016, vol. 86, no. 9, pp. 20–23 (in Russian).

4. **Medich J.** *Statisticheskie optimal'nye lineynye ocenki i upravlenie* (Statistical optimal linear estimates and control), Moscow, Energiya, 1972, 440 p. (in Russian).

5. **Devyatisilny A. S., Stotsenko A. K.** *Issledovanie odnositel'nogo prodol'nogo dvizheniya avtomobilej v sisteme "lider — vedomyj"* (Investigation of the relative longitudinal motion of cars in the "leader-driven" system), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 285–288 (in Russian).

УДК 519.6, 629.78

DOI: 10.17587/mau.18.787-792

И. А. Панкратов, канд. техн. наук, доц., науч. сотр., PankratovIA@info.sgu.ru,

Саратовский национальный исследовательский государственный университет

имени Н. Г. Чернышевского, г. Саратов, Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов

Эволюционный алгоритм минимизации затрат характеристической скорости на переориентацию орбиты космического аппарата

В кватернионной постановке рассмотрена задача оптимальной переориентации орбиты космического аппарата (КА). Рассмотрен актуальный частный случай задачи, когда орбита КА является круговой, а управление принимает свои максимальные по модулю значения на отдельных участках активного движения КА (при этом также присутствуют участки пассивного движения КА). Построен оригинальный эволюционный алгоритм нахождения оптимальных траекторий перелетов КА, в котором неизвестными величинами являются длительности участков движения КА. Приведены примеры численного решения задачи для случаев, когда отличие между начальной и конечной ориентациями орбиты КА составляет единицы (или десятки) градусов в угловой мере. Рассмотрен случай, когда конечная ориентация орбиты КА соответствует ориентации орбиты одного из спутников отечественной орбитальной группировки ГЛОНАСС. Построены графики изменения компонент кватерниона ориентации орбитальной системы координат, отклонения текущего положения орбиты КА от требуемого, оптимального управления. Установлены особенности и закономерности процесса оптимальной переориентации орбиты КА.

Ключевые слова: космический аппарат, орбита, кватернион, оптимизация, ген

1. Постановка задачи

Предположим, что вектор ускорения $\mathbf{u}$ от тяги реактивного двигателя во все время управляемого движения КА направлен ортогонально плоскости его орбиты. Тогда орбита КА во время управляемого движения центра масс КА не меняет своей формы и размеров. Орбита КА поворачивается в пространстве под действием управления как неизменяемая (недеформируемая) фигура. Рассмотрим следующую задачу: пусть необходимо перевести

орбиту КА, движение центра масс которого описывается уравнениями [1]

$$2\dot{\lambda} = \lambda \circ \omega_\eta,$$

$$\omega_\eta = (ur/c) \mathbf{i}_1 + (c/r^2) \mathbf{i}_3,$$

$$\dot{\varphi} = c/r^2,$$

$$r = p/(1 + e \cos \varphi),$$

$$c = \text{const}$$

из заданного начального состояния

$$t = t_0 = 0,$$

$$\varphi(0) = \varphi_0,$$

$$\lambda(0) = \lambda^{(0)} = \Lambda^0 \circ (\cos(\varphi_0/2) + \mathbf{i}_3 \sin(\varphi_0/2)) \quad (1)$$

в конечное состояние, принадлежащее многообразию

$$t = t^* = ? \text{ (время окончания управляемого процесса неизвестно),}$$

$$\varphi(t^*) = \varphi^*,$$

$$\text{vect}[\bar{\lambda}(t^*) \circ \Lambda^* \circ (\cos(\varphi^*/2) + \mathbf{i}_3 \sin(\varphi^*/2))] = \mathbf{0} \quad (2)$$

(черта над кватернионом — символ сопряжения), с помощью кусочно-постоянного управления

$$u(t) = (-1)^k u_{start}, \text{ если } t_{2k} \leq t \leq t_{2k+1} \\ (k = 0, 1, \dots, \text{INT}(0,5(M-1)));$$

$$u(t) = 0, \text{ если } t_{2k-1} \leq t \leq t_{2k} (k = 1, \dots, \text{INT}(0,5M)).$$

Здесь $\text{INT}(\dots)$ — целая часть числа в скобках, M — число участков движения КА.

При этом необходимо минимизировать затраты характеристической скорости [2] на переориентацию орбиты КА. Отметим, что число участков движения КА M полагается заданным. Известно, что в случае при минимизации затрат характеристической скорости оптимальное управление, которое находится с помощью принципа максимума Л. С. Понтрягина [3], имеет именно такой вид.

Здесь $\lambda = \lambda_0 + \lambda_1 \mathbf{i}_1 + \lambda_2 \mathbf{i}_2 + \lambda_3 \mathbf{i}_3$ — нормированный кватернион ориентации орбитальной системы координат η в инерциальной системе координат X (ось η_1 этой системы координат направлена вдоль радиуса-вектора $\mathbf{r}$ центра масс КА, а ось η_3 перпендикулярна плоскости орбиты); $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \mathbf{i}_3$ — векторные мнимые единицы Гамильтона; $\circ$ — символ кватернионного умножения, верхняя точка означает производную по времени t , дифференцирование выполняется в предположении неизменности величин $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \mathbf{i}_3$; φ — истинная аномалия (угол между $\mathbf{r}$ и радиусом-вектором перицентра орбиты КА), эта переменная характеризует положение КА на орбите; $r = |\mathbf{r}|$; p и e — параметр и эксцентриситет орбиты; $c = |\mathbf{r} \times d\mathbf{r}/dt|$ — постоянная площадей; u — алгебраическая величина реактивного ускорения; $\Lambda = \Lambda_0 + \Lambda_1 \mathbf{i}_1 + \Lambda_2 \mathbf{i}_2 + \Lambda_3 \mathbf{i}_3$ — кватернион ориентации орбиты КА; $u_{start} \in \{-u_{\max}, u_{\max}\}$ — значение управления на первом участке активного движения КА; $\Delta_k = t_k - t_{k-1}$ — искомые величины (длительности участков активного движения КА).

Известно, что кватернион Λ получается из кватерниона ориентации орбитальной системы координат с помощью поворота

$$\Lambda = \lambda \circ (\cos(\varphi^*/2) - \mathbf{i}_3 \sin(\varphi^*/2)).$$

В данной задаче известны c, p, e, φ_0 , а также начальное и конечное значения кватерниона ориентации орбиты КА. Необходимо найти длительности участков активного движения КА.

Введем безразмерные переменные по формулам $r = Rr^b, t = Tt^b, u = u_{\max}u^b$. Здесь R — характерное расстояние (величина, близкая к длине большой полуоси орбиты управляемого КА); $T = R^2/c$ — характерное время. Компоненты кватерниона ориентации орбиты КА λ_j являются безразмерными. После элементарных преобразований система фазовых уравнений примет вид [4]

$$2\lambda^* = \lambda \circ \omega^b;$$

$$\omega^b = (Nu^b r^b) \mathbf{i}_1 + \mathbf{i}_3; \quad (3)$$

$$\varphi^* = (r^b)^{-2};$$

$$r^b = 1/(1 + e \cos \varphi).$$

Здесь $N = u_{\max} R^3/c^2$ — характерный безразмерный параметр задачи.

Ограничение по управлению в безразмерном виде:

$$-1 \leq u^b \leq 1.$$

2. Алгоритм решения задачи

Ранее в работах [4, 5] поставленная задача решалась с помощью принципа максимума Л. С. Понтрягина. В результате применения принципа максимума была получена краевая задача с подвижным правым концом, которая решалась численно с помощью итерационного метода [6]. К сожалению, в этой задаче не найдены формулы для нахождения неизвестных начальных значений сопряженных переменных. При этом начальные приближения для значений сопряженных переменных плохо сходятся к тем значениям, которые доставляют нули функциям невязок. Итерационные методы постоянно попадают в локальные минимумы функций невязок. В настоящей статье построен эволюционный алгоритм решения этой задачи. При применении этого алгоритма не нужно искать начальные значения сопряженных переменных. Подобные методы, основанные на искусственном интеллекте и машинном обучении, рассматриваются, например, в работах [7, 8]. Опишем основные этапы эволюционного алгоритма, следуя книге [9].

Далее будем рассматривать случай, когда орбита КА является круговой, при этом $e = 0$, а $r^b = 1$. Отметим, что орбиты спутниковых группировок ГЛОНАСС и GPS близки к круговым.

Вначале необходимо случайным образом сгенерировать популяцию из $N_{\max}$ пробных решений (особей), каждое из которых представляет собой набор из M вещественных чисел. При этом вместо вещественного числа Δ_k в памяти хранится целое число u_k^{int} (ген), $(0 \leq u_k^{int} \leq 2^L - 1)$. Связь между искомым вещественным числом и геном дается формулой

$$\Delta_k = \Delta T_{\max} u_k^{int} / (2^L - 1),$$

где $\Delta T_{\max}$ — заданная максимальная длительность активного участка движения КА.

На втором шаге алгоритма для каждой особи находится по известной формуле [10]

$$\lambda(t_k) = \lambda(t_{k-1}) \circ (\cos(0,5\omega\Delta_k) + \omega^{-1}\sin(0,5\omega\Delta_k)\omega^b); (4)$$

$$\omega^b = (Nu^b r^b)\mathbf{i}_1 + \mathbf{i}_3, \omega = |\omega^b|$$

значение кватерниона ориентации орбитальной системы координат при $t = t^* = t_M$ с начальными условиями (1) (управление задается выбранной хромосомой). В качестве значения функции приспособленности (целевой функции) берется модуль левой части соотношения (2). Как известно, принцип естественного отбора заключается в том, что в конкурентной борьбе выживает наиболее приспособленная особь. В нашем случае, чем меньше значение целевой функции, тем более приспособленной является особь, т. е. пробное решение, использовавшееся в качестве аргумента целевой функции. Если на этом шаге для некоторой особи значение целевой функции меньше наперед заданного малого числа ε , то выполнение алгоритма заканчивается, а управление, соответствующее данной особи, выдается в качестве решения задачи. Если же превышено максимальное число итераций N_{iter}^{max} , то в качестве решения задачи выдается управление, соответствующее особи с минимальным значением целевой функции.

На третьем шаге алгоритма отбрасывается половина особей, имеющих наибольшие (худшие) значения целевой функции (предполагается, что число особей N_{max} является четным). Затем проводится скрещивание особи с наименьшим значением целевой функции со всеми остальными, в том числе и с самой собой. В качестве оператора скрещивания был выбран метод промежуточной рекомбинации [9]. Потомки создаются по следующему правилу:

$$\text{Потомок} = \text{Родитель1} + \alpha(\text{Родитель2} - \text{Родитель1}).$$

Здесь α — случайное число на отрезке $[-0,25; 1,25]$.

Для каждого гена создаваемого потомка выбирается отдельный множитель α . Полученные гены потомка округляются до ближайших целых чисел, лежащих на отрезке $[0; 2^L - 1]$. В результате получается новая популяция из N_{max} особей.

На четвертом шаге алгоритма вычисляется среднее значение целевой функции для популяции, полученной на третьем шаге. Если оно больше, чем среднее значение целевой функции, вычисленное на втором шаге, то осуществляется мутация особей в популяции. Для этого гены всех особей записываются в двоичном виде (на каждый ген отводится ровно L бит) и с вероятностью $p_{mut} \in (0; 1]$ проводится инвертирование случайным образом выбранного бита каждого гена. Затем осуществляется возврат ко второму шагу алгоритма.

Отметим, что описанный алгоритм необходимо применять неоднократно для разных начальных популяций. При этом будет получено несколько решений, из которых необходимо выбрать то, кото-

рое соответствует переориентации орбиты с меньшими затратами характеристической скорости.

3. Примеры численного решения задачи

Для численного решения поставленной задачи с помощью описанного выше алгоритма была составлена программа на языке Python.

Величины, характеризующие форму, размеры орбиты КА, начальное и конечное положения КА на орбите, начальную и конечную ориентации орбиты КА, полагались равными [11] (a_{or} — большая полуось орбиты):

$$a_{or} = 25\,500\,000 \text{ м}, u_{max} = 0,101907 \text{ м/с}^2,$$

$$N = 0,35, \varphi_0 = 3,940323 \text{ рад};$$

а) начальная ориентация орбиты КА:

$$\Lambda_0^0 = 0,679417, \Lambda_1^0 = -0,245862,$$

$$\Lambda_2^0 = -0,539909, \Lambda_3^0 = -0,353860;$$

$$\lambda_0^0 = 0,061834, \lambda_1^0 = -0,451574,$$

$$\lambda_2^0 = 0,457556, \lambda_3^0 = 0,763545;$$

конечная ориентация орбиты КА:

- *вариант 1* (малое отличие в ориентациях орбит КА):

$$\Lambda_0^* = 0,678275, \Lambda_1^* = -0,268667,$$

$$\Lambda_2^* = -0,577802, \Lambda_3^* = -0,366116;$$

- *вариант 2* (большое отличие в ориентациях орбит КА):

$$\Lambda_0^* = -0,440542, \Lambda_1^* = -0,522476,$$

$$\Lambda_2^* = -0,125336, \Lambda_3^* = -0,719189;$$

- *вариант 3* (большое отличие в ориентациях орбит КА, ГЛОНАСС):

$$\Lambda_0^* = -0,255650, \Lambda_1^* = -0,162241,$$

$$\Lambda_2^* = 0,510674, \Lambda_3^* = 0,804694;$$

б) начальная ориентация орбиты КА:

$$\Lambda_0^0 = 0,235019, \Lambda_1^0 = -0,144020,$$

$$\Lambda_2^0 = -0,502258, \Lambda_3^0 = 0,819610;$$

$$\lambda_0^0 = -0,663730, \lambda_1^0 = 0,518734,$$

$$\lambda_2^0 = -0,062608, \lambda_3^0 = -0,535217;$$

конечная ориентация орбиты КА:

- *вариант 4* (малое отличие в ориентациях орбит КА, ГЛОНАСС):

$$\Lambda_0^* = -0,255650, \Lambda_1^* = -0,162241,$$

$$\Lambda_2^* = 0,510674, \Lambda_3^* = 0,804694.$$

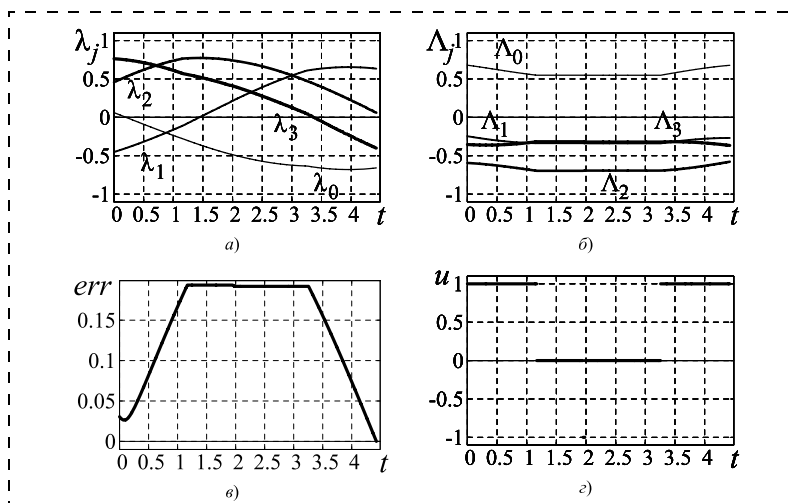


Рис. 1. Круговая орбита, вариант 1, $M = 5$:

a — компоненты кватерниона ориентации орбитальной системы координат; b — компоненты кватерниона ориентации орбиты КА; c — отклонение ориентации орбиты от требуемой; d — оптимальное управление

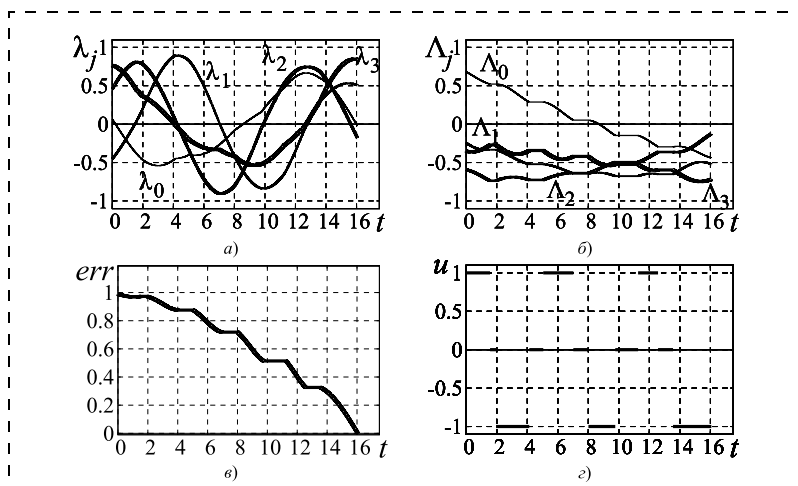


Рис. 2. Круговая орбита, вариант 2, $M = 11$:

a — компоненты кватерниона ориентации орбитальной системы координат; b — компоненты кватерниона ориентации орбиты КА; c — отклонение ориентации орбиты от требуемой; d — оптимальное управление

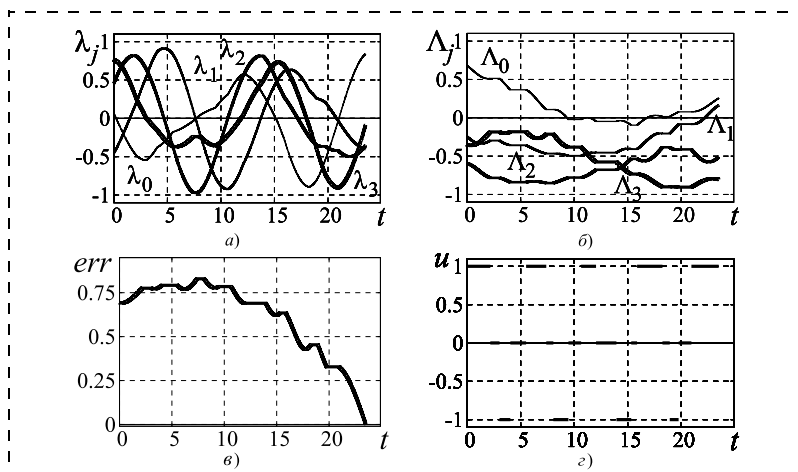


Рис. 3. Круговая орбита, вариант 3, $M = 17$:

a — компоненты кватерниона ориентации орбитальной системы координат; b — компоненты кватерниона ориентации орбиты КА; c — отклонение ориентации орбиты от требуемой; d — оптимальное управление

Масштабирующие множители равны: $R = 26\,000\,000$ м, $T = 9449,714506$ с. Они соответствуют значениям декартовых координат и проекций вектора скорости центра масс КА, приведенным в книге [12].

Отметим, что в вариантах 1, 4 отличие ориентаций орбит по долготе восходящего узла, наклону, угловому расстоянию перицентра от узла составляет единицы градусов; а в вариантах 2, 3 — десятки градусов в угловой мере. В третьем и четвертом вариантах кватернион конечной ориентации орбиты КА соответствует ориентации орбиты одного из спутников отечественной орбитальной группировки ГЛОНАСС.

Параметры генетического алгоритма полагались равными:

$$L = 40, N_{\max} = 10\,000, p_{\text{mut}} = 0,9.$$

На рис. 1—4 приведены результаты решения задачи оптимальной переориентации круговой орбиты КА для вариантов 1—4. Здесь

$$\begin{aligned} \text{err} &= \text{err}(t) = \\ &= |\text{vect}[\lambda(t)^* \circ \Lambda^* \circ (\cos((\varphi_0 + t)/2) + \\ &\quad + i_3 \sin((\varphi_0 + t)/2))]|. \end{aligned}$$

В ходе численного решения задачи было установлено, что при смене знака управления на первом участке активного движения КА (а также при увеличении числа активных участков движения КА) затраты характеристической скорости на переориентацию орбиты КА увеличиваются. Отметим, что использование аналитических формул (4) вместо численного интегрирования уравнений (3) методом Рунге—Кутты позволяет значительно ускорить работу алгоритма. При сохранении приемлемой длительности работы программы становится возможным на несколько порядков увеличить число особей в популяции и быстрее найти решение задачи. Отметим также, что длительности второго и третьего участков движения КА в расчетах для варианта 4 на два порядка меньше длительностей остальных участков. В то же время получить решение задачи с меньшим числом участков движения КА не удалось. Также было установлено, что длительность переориентации орбиты КА для второго и третьего вариантов граничных условий больше, чем в случае малого отличия в ориентациях орбит КА. Более того, оказалось, что решить задачу с помощью предложенного алгоритма

проще в случае, когда начальная и конечная орбиты КА близки друг к другу.

В дальнейшем предполагается модифицировать описанный в статье эволюционный алгоритм так, чтобы оптимальное число участков движения КА определялось в ходе решения задачи.

Список литературы

1. Челноков Ю. Н. Применение кватернионов в задачах оптимального управления движением центра масс космического аппарата в ньютоновском гравитационном поле. I // Космические исследования. 2001. Т. 39. Вып. 5. С. 502–517.
2. Абалакин В. К., Аксенов Е. П., Гребенников Е. А. и др. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике. М.: Наука, 1976. 864 с.
3. Понtryгин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1983. 393 с.
4. Панкратов И. А., Сапунков Я. Г., Челноков Ю. Н. Решение задачи оптимальной переориентации орбиты космического аппарата с использованием кватернионных уравнений ориентации орбитальной системы координат // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2013. Т. 13, вып. 1, ч. 1. С. 84–92.
5. Панкратов И. А., Сапунков Я. Г., Челноков Ю. Н. Численное исследование задачи переориентации орбиты космического аппарата с использованием орбитальной системы координат // Математика. Механика. 2012. Вып. 14. С. 132–136.
6. Моисеев Н. Н. Численные методы в теории оптимальных систем. М.: Наука, 1971. 424 с.
7. Dachwald B. Optimization of very-low-thrust trajectories using evolutionary neurocontrol // Acta Astronautica. 2005. Vol. 57, N. 2–8. P. 175–185.
8. Coverstone-Carroll V., Hartmann J. W., Mason W. J. Optimal multi-objective low-thrust spacecraft trajectories // Computer methods in applied mechanics and engineering. 2000. Vol. 186, N. 2–4. P. 387–402.

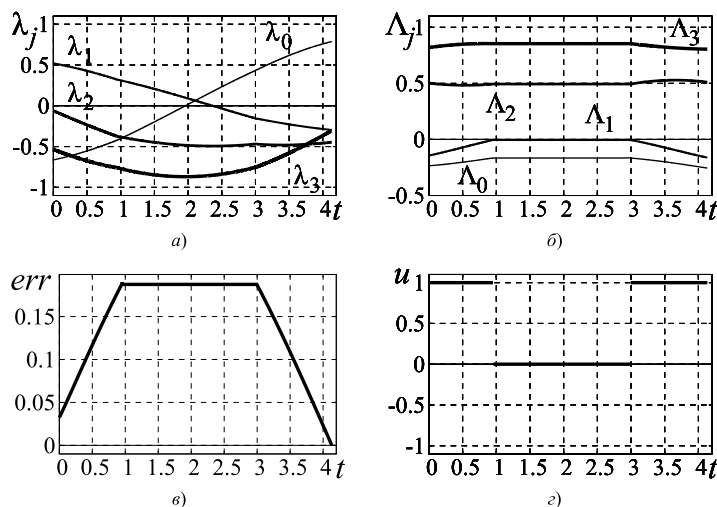


Рис. 4. Круговая орбита, вариант 4, $M = 5$:

a — компоненты кватерниона ориентации орбитальной системы координат; $б$ — компоненты кватерниона ориентации орбиты КА; $в$ — отклонение ориентации орбиты от требуемой; $г$ — оптимальное управление

9. Панченко Т. В. Генетические алгоритмы. Астрахань: Издательский дом "Астраханский университет", 2007. 87 с.
10. Панкратов И. А., Челноков Ю. Н. Аналитическое решение дифференциальных уравнений ориентации круговой орбиты космического аппарата // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2011. Т. 11, Вып. 1. С. 84–89.
11. Челноков Ю. Н. Применение кватернионов в задачах оптимального управления движением центра масс космического аппарата в ньютоновском гравитационном поле. III // Космические исследования. 2003. Т. 41, Вып. 5. С. 488–505.
12. Бордовицына Т. В. Современные численные методы в задачах небесной механики. М.: Наука, 1984. 136 с.

Evolutionary Algorithm for Minimizing the Characteristic Velocity for the Reorientation of the Spacecraft Orbit

I. A. Pankratov, PankratovIA@info.sgu.ru✉, National Research Saratov State University, Precision Mechanics and Control Problems Institute of RAS, Saratov

Corresponding author: Pankratov Ilia A., Ph. D., Associate Professor, Researcher, Department of Mathematic and Computer Modeling, National Research Saratov State University, Saratov, 410012, Russian Federation, Laboratory of Mechanics, Navigation and Motion Control, Precision Mechanics and Control Problems Institute, RAS, Saratov, 410028, Russian Federation e-mail: PankratovIA@info.sgu.ru

Accepted on August 17, 2017

The problem of optimal reorientation of spacecraft orbit is considered in quaternion formulation. Control (jet thrust vector orthogonal to the plane of the orbit) is limited in magnitude. It is necessary to minimize the costs of characteristic velocity for the process of reorientation of the spacecraft orbit. To describe the motion of the spacecraft center of mass quaternion differential equation of the orientation of the orbital coordinate system was used. The actual special case of the problem, when the spacecraft's orbit is circular and control equals to its maximum (in modulus) value on adjacent parts of active spacecraft motion (there are also parts of passive motion of the spacecraft), was considered. Various iterative methods (Newton's method, gradient descent method, etc.) are often used to solve boundary value problems obtained as a result of the maximum principle. There are no formulas for finding unknown initial values of conjugate variables. Original evolutionary algorithm for finding the trajectories of spacecraft fastest flights is built. In this case the lengths of the sections of the spacecraft motion are unknown. This method does not require any information about the unknown initial values of conjugate variables. The high speed of operation of the proposed evolutionary algorithm is achieved through the use of existing in this case, a known analytical solution of equations of the problem. Examples of numerical solution of the problem for the case when the difference between the initial and final orientations of the spacecraft's orbit equals to a few (or tens of) degrees in angular measure, are given. Also the case was

considered when the final orientation of the spacecraft's orbit corresponds to one of the satellites of Russian GLONASS orbital grouping. The graphs of components of the quaternion of orientation of the orbital coordinate system, the deviation of the current position of the spacecraft's orbit to the required and optimal control are drawn. Specific features and regularities of the process of optimum reorientation of the spacecraft's orbit are given.

Keywords: spacecraft, orbit, optimization, quaternion, gene

For citation:

Pankratov I. A. Evolutionary Algorithm for Minimizing the Characteristic Velocity for the Reorientation of the Spacecraft Orbit, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 787–792.

DOI: 10.17587/mau.18.787-792

References

1. **Chelnokov Yu. N.** The use of quaternions in the optimal control problems of motion of the center of mass of a spacecraft in a newtonian gravitational field: I, *Cosmic Research*, 2001, vol. 39, no. 5, pp. 470–484 (in Russian).
2. **Abalakin V. K., Aksenov E. P., Grebennikov E. A.** i dr. *Spravochnoe rukovodstvo po nebesnoi mekhanike i astrodinamike* (Reference guide to celestial mechanics and astrodynamics), Moscow, Nauka, 1976, 864 p. (in Russian).
3. **Pontriagin L. S., Boltianskii V. G., Gamkrelidze R. V., Mishchenko E. F.** *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* (Mathematical theory of optimal processes), Moscow, Nauka, 1983, 393 p. (in Russian).
4. **Pankratov I. A., Sapunkov Ya. G., Chelnokov Yu. N.** *Reshenie zadachi optimal'noi pereorientatsii orbity kosmicheskogo apparata s ispol'zovaniem kvaternionnykh uravnenii orientatsii orbital'noi sistemy koordinat* (Solution of a problem of spacecraft's orbit optimal reorientation using quaternion equations of orbital system of coordinates orientation), *Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Matematika. Mekhanika. Informatika*, 2013, vol. 13, iss. 1, pt. 1, pp. 84–92 (in Russian).
5. **Pankratov I. A., Sapunkov Ya. G., Chelnokov Yu. N.** *Chislennoe issledovanie zadachi pereorientatsii orbity kosmicheskogo apparata*

s ispol'zovaniem orbital'noi sistemy (Numerical investigation of the task of reorientation of the spacecraft orbit using the orbital coordinate system), *Matematika. Mekhanika*, 2012, iss. 14, pp. 132–136 (in Russian).

6. **Moiseev N. N.** *Chislennyye metody v teorii optimal'nykh sistem* (Numerical methods in the theory of optimal systems), Moscow, Nauka, 1971, 424 p. (in Russian).
7. **Dachwald B.** Optimization of very-low-thrust trajectories using evolutionary neurocontrol, *Acta Astronautica*, 2005, vol. 57, no. 2–8, pp. 175–185.
8. **Coverstone-Carroll V., Hartmann J. W., Mason W. J.** Optimal multi-objective low-thrust spacecraft trajectories, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2000, vol. 186, no. 2–4, pp. 387–402.
9. **Panchenko T. V.** *Geneticheskie algoritmy* (Genetic algorithms), Astrakhan', Izdatel'skii dom "Astrakhanskii universitet", 2007, 87 p. (in Russian).
10. **Pankratov I. A., Chelnokov Yu. N.** *Analiticheskoe reshenie differentsial'nykh uravnenii orientatsii krugovoi orbity kosmicheskogo apparata* (Analytical solution of differential equations of circular spacecraft's orbit orientation), Publishing house of Sarat. university, *Nov. ser. Ser. Matematika. Mekhanika. Informatika*, 2011, vol. 11, iss. 1, p. 84–89 (in Russian).
11. **Chelnokov Yu. N.** The use of quaternions in the optimal control problems of motion of the center of mass of a spacecraft in a Newtonian gravitational field: III, *Cosmic Research*, 2003, vol. 41, no. 5, pp. 460–477 (in Russian).
12. **Bordovitsyna T. V.** *Sovremennyye chislennyye metody v zadachakh nebesnoi mekhaniki* (Modern numerical methods in the problems of celestial mechanics), Moscow, Nauka, 1984, 136 p. (in Russian).

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 *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 31.08.2017. Подписано в печать 11.10.2017. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН1117 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 "Авансд солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансд солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.

Рисунки к статье Ю.В. Подураева
**«ПОДХОД И ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ КОЛЛАБОРАТИВНОЙ
 РОБОТОТЕХНИКИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ХИРУРГИИ И БИОПРИНТИНГА»**

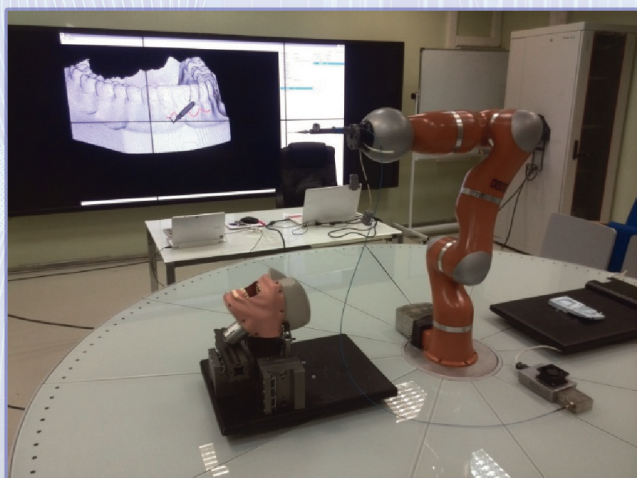


Рис. 1. Роботизированный мультифункциональный хирургический комплекс для лазерной челюстно-лицевой хирургии



Рис. 2. Экспериментальный стенд роботической биопечати эмали in situ

Рисунки к статье В. П. Андреева, В.Э. Тарасовой
**«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ ПРЕПЯТСТВИЙ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ С ПОМОЩЬЮ
 СКАНИРУЮЩИХ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДАТЧИКА»**



Рис. 1. Робот-гуманоид REEM



Рис. 2. Робот ROBOSEM

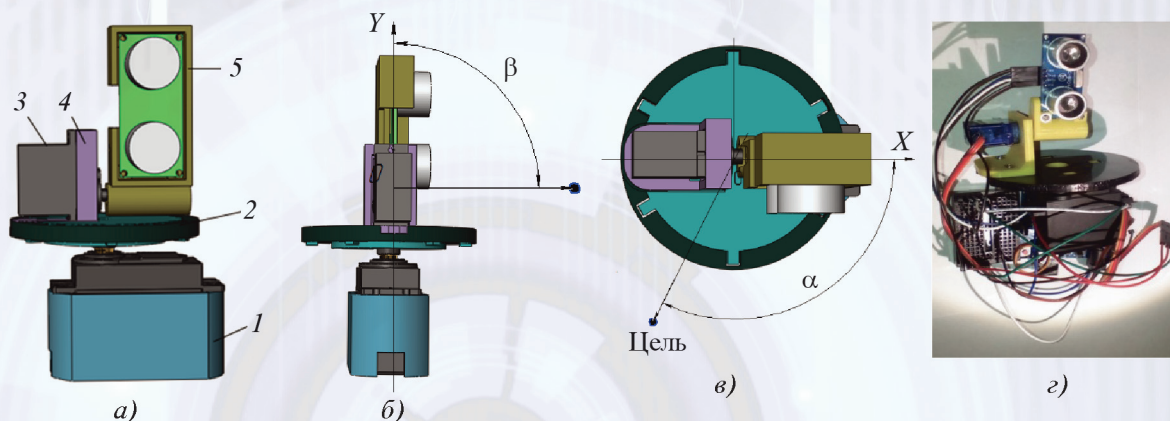
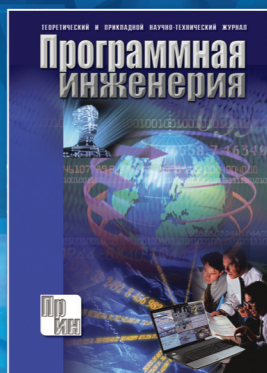


Рис. 4. Устройство с УЗ датчиком: а – вид спереди; б – вид сбоку; в – вид сверху; г – фотография устройства

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, Стромьинский пер., 4. Издательство “НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ”

Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10.

E-mail: antonov@novtex.ru