

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 16

2015

№ 3

Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Редакционный совет:

CHYI-YEU LIN, PhD, 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.
КАЛЯЕВ И. А., чл.-корр. 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.
СЕБЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН, проф.
СИГОВ А. С., акад. РАН, проф.
СОЙФЕР В. А., чл.-корр. 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.
ШЕРБАТЮК 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

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Пашаев А. М., Ализаде А. А., Алиев Т. А., Аббасов А. М., Гулуев Г. А., Пашаев Ф. Г., Саттарова У. Э. Интеллектуальная сейсмоакустическая система выявления зоны очага ожидаемого землетрясения. 147

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Рутковский В. Ю., Суханов В. М., Глумов В. М. К задаче управления маломерным свободнолетающим космическим роботом 159

Градецкий В. Г., Князьков М. М., Семёнов Е. А., Суханов А. Н. Движение мобильного робота по горизонтальным, наклонным и вертикальным поверхностям при наличии возмущений и подвижных препятствий. 166

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ

Балакина Е. В., Зотов Н. М., Федин А. П. Особенности компьютерного моделирования в реальном времени процесса торможения автомобильного колеса 174

Горячев О. В., Ефромеев А. Г. Алгоритм управления приводом стабилизации и изменения углового положения объекта с вращающимся основанием 182

Журнал в журнале**"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА
В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"**

Левский М. В. Особенности управления ориентацией космического аппарата, оборудованного инерционными исполнительными органами. 188

Шукалов А. В., Парамонов П. П., Жаринов И. О., Жаринов О. О., Костишин М. О. Алгоритм и методика автоматизации процедуры оценивания координат цветности элементов изображения бортовых средств индикации в авионике 195

Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю., Коноплин Н. Ю. Метод синтеза систем автоматической коррекции линейных перемещений подводных аппаратов 204

Дорожко В. М. Динамическое воздействие "волны-убийцы" на контур морского судна. 209

Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата 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



MEHATRONIKA, AVTOMATIZACIA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editorial Council:

ALIEV T. A., Azerbaijan
 ANSHAKOV G. P., Russia
 BOLOTNIK N. N., Russia
 CHENTSOV A. G., Russia
 CHERNOUSKO F. L., Russia
 CHYI-YEU LIN, PhD, Prof., Taiwan
 FEDOROV I. B., Russia
 JEN-HWA GUO, PhD, Prof., Taiwan
 KALYAEV I. A., Russia
 KATALINIC B., PhD, Prof., Austria
 KRASNEVSKIY L. G., Belarus
 KUZNETSOV N. A., Russia
 LEONOV G. A., Russia
 MATVEENKO A. M., Russia
 MIKRIN E. A., Russia
 PESHEKHONOV V. G., Russia
 REZCHIKOV A. F., Russia
 SCHERBATYUK A. F., Russia
 SEBRYAKOV G. G., Russia
 SIGOV A. S., Russia
 SOJFER V. A., Russia
 SOLOMENTSEV Yu. M., Russia
 SOLOVJEV V. A., Russia
 SUBUDHI B., PhD, Prof., India
 VASILYEV S.N., Russia
 YUSUPOV R. M., Russia

Editor-in-Chief:

FILIMONOV N. B., Russia

Deputy Editor-in-Chief:

PODURAEV Yu. V., Russia
 PUTOV V. V., Russia
 YUSCHENKO A. S., Russia

Responsible Secretary:

BEZMEANOVA M. Yu., Russia

Editorial Board:

ALEXANDROV V. V., Russia
 ANTONOV B. I., Russia
 ARSHANSKY M. M., Russia
 BUKOV V. N., Russia
 FILARETOV V. F., Russia
 FRADKOV A. L., Russia
 FURSOV V. A., Russia
 GRADETSKY V. G., Russia
 ILYASOV B. G., Russia
 IVCHENKO V. D., Russia
 KOLOSOV O. S., Russia
 KOROSTELEV V. F., Russia
 LEBEDEV G. N., Russia
 LOKHIN V. M., Russia
 PAVLOVSKY V. E., Russia
 PROKHOROV N. L., Russia
 PSHIKHOPOV V. Kh., Russia
 RAPOPORT E. Ya., Russia
 SERGEEV S. F., Russia
 VITTIKH V. A., Russia
 YUREVICH E. I., Russia

Editorial Staff:

GRIGORIN-RYABOVA E.V., Russia

CONTENTS

INTELLIGENT INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS

- Pashayev A. M., Alizada A. A., Aliev T. A., Abbasov A. M., Guluyev G. A., Pashayev F. G., Sattarova U. E.** Intelligent Seismic-Acoustic System for Identifying the Location of the Focus of an Expected Earthquake 147

ROBOTIC SYSTEMS

- Rutkovsky V. Yu., Sukhanov V. M., Glumov V. M.** On a Small Free-Flying Space Robot Control Task 159
- Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Semionov E. A., Sukhanov A. N.** Mobile Robot's Movement on Vertical and Horizontal Surfaces and Slopes in the Conditions of External Disturbances and Existing Moving Objects 166

MODELING AND CONTROL IN MECHATRONIC SYSTEMS

- Balakina E. V., Zotov N. M., Fedin A. P.** Features of Computer Simulation in Real Time of the Braking Process of Automobile Wheel. 174
- Goryachev O. V., Efromeev A. G.** Algorithm for Control of the Stabilization Drive of an Object with a Rotating Basis 182

Journal within journal

"CONTROL AND INFORMATICS IN AEROSPACE AND MARINE SYSTEMS"

- Levskii M. V.** Features of Attitude Control of a Spacecraft, Equipped with Inertial Actuators 188
- Shukalov A. V., Paramonov P. P., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Kostishin M. O.** Algorithm and Methodology for Automation of Estimation Procedure of Chromaticity Coordinates of Pixel Airborne Avionics Display 195
- Filaretov V. F., Konoplin A. Yu., Konoplin N. Yu.** Method of Synthesis of Automatic Correction Systems of the Linear Displacements of the Underwater Vehicles 204
- Dorozhko V. M.** Dynamic Impact of Rogue Wave on a Seagoing Vessel Contour 209

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

УДК 621.391

А. М. Пашаев¹, д-р физ.-мат. наук, ректор, info@naa.baku.az,
А. А. Ализаде², д-р геол.-минер. наук, акад. НАНА, директор, president@science.az,
Т. А. Алиев³, д-р техн. наук, акад. НАНА, директор, telmancyber@rambler.ru,
А. М. Аббасов⁴, д-р техн. наук, акад. НАНА, министр, ali@elm.az,
Г. А. Гулуев³, PhD, зав. лаб., scb_06@mail.ru,
Ф. Г. Пашаев³, PhD, вед. науч. сотр., pasha.farhad@gmail.com,
У. Э. Саттарова³, PhD, ст. науч. сотр., ulker.rzaeva@gmail.com,
¹ Национальная авиационная академия Азербайджана,
² Институт геологии Национальной академии наук Азербайджана,
³ Институт систем управления Академии наук Азербайджана,
⁴ Министерство связи и информационных технологий Азербайджана

Интеллектуальная сейсмоакустическая система выявления зоны очага ожидаемого землетрясения

Проанализированы результаты Noise-технологии мониторинга аномальных сейсмических процессов, проводимых с июля 2010 г. по июнь 2014 г. на девяти сейсмоакустических станциях, построенных на устьях скважин глубиной 10, 200, 300, 1400...5000 м. По результатам экспериментальных данных, полученных в течение более трех лет, создана интеллектуальная система, позволяющая по комбинациям времени изменения оценки взаимокорреляционной функции между полезным сигналом и помехой сейсмоакустической информации, полученной от различных станций за 10...20 ч до землетрясения, выявить местонахождение его зоны. Система в перспективе может быть использована сейсмологами как инструмент при определении местонахождения зоны ожидаемого землетрясения.

Ключевые слова: сейсмический мониторинг, аномальные сейсмические процессы, интеллектуальная сейсмоакустическая система, робастная Noise-технология, обработка сейсмоакустической информации, экспертная система, нейросетевой прогноз зон землетрясения

Введение

В последние годы интенсивно ведутся работы по изучению причин и природы землетрясений [1—3]. Продолжается также изучение возможности получения всевозможной сейсмической информации из глубинных пластов земли [3—7]. К анализу сеймо-сигналов, получаемых при землетрясениях, применяются такие методы, как вейвлет-преобразование и методы конечных элементов [4, 8—11]. Во всех этих исследованиях проблемы, связанные с прогнозированием землетрясений, остаются основным направлением научно-исследовательских работ [12—24]. Созданы и создаются различные модели и технологии [25—28], разработаны и внедрены многочисленные системы раннего предупреждения населения, модели и технологии быстрого реагирования спасательных сил соответствующих структур [25—28]. Несмотря на вышеупомянутые научно-технические работы в настоящее время землетрясения своевременно не прогнозируются, что приводит к многочисленным катастрофическим последствиям [28—38].

В работах [39—41] предлагается сейсмоакустическая система мониторинга начала процесса подготовки землетрясения. Система состоит из сети девяти сейсмоакустических станций робастного Noise-мониторинга аномальных сейсмических процессов (RNM АСП). В результате экспериментов, проводимых на этих станциях с июля 2010 г., установлено, что при зарождении АСП возникает взаимная корреляционная связь между полезным сигналом и помехой сейсмоакустической информации.

Результат эксплуатации этих станций показал, что каждая из них в отдельности по изменению оценки взаимной корреляционной функции между полезным сигналом и помехой надежно осуществляет индикацию процессов зарождения АСП, предшествующих землетрясению. Однако определение координат ожидаемого землетрясения с достаточной точностью с применением этих станций невозможно. Экспериментальные исследования показали, что имеется возможность создания интеллектуальной системы, которая позволит с помощью этих станций выявить местоположение зоны АСП. Ниже рассматривается один из возможных вариантов создания такой системы.

Постановка задачи

Известно, что в сейсмических регионах, как правило, после определенного промежутка времени T_0 нормального сейсмического состояния в результате зарождения аномальных сейсмических процессов по истечении определенного промежутка времени T_1 происходит землетрясение. Несмотря на различия длительностей времени T_0 , T_1 , задача мониторинга начала времени зарождения АСП сводится к обеспечению надежной индикации начала периода T_1 . Этот вопрос подробно рассмотрен в работах [39–41].

В работе [39] была поставлена задача создания технологии и системы, позволяющей фиксировать момент начала периода времени T_1 . Однако проведенные экспериментальные исследования [39–44] показали, что начало периода T_1 происходит не только при зарождении АСП. Поэтому для мониторинга начала процесса зарождения АСП, кроме регистрации начала периода T_1 , также необходимо осуществить индикацию изменения оценки взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$.

Поэтому в предлагаемой работе ставится задача применения оценки $R_{X\varepsilon}(\mu)$ сейсмоакустического сигнала $g(i\Delta t)$ как информативного признака для индикации начала зарождения АСП. Для этого в процессе мониторинга необходимо вычислить оценку $R_{X\varepsilon}(\mu)$.

Кроме того, для практического применения сети станций RNM АСП необходимо создание технологии определения местонахождения зоны АСП. Для решения этой задачи сначала рассмотрим возможность применения существующих методик вычисления эпицентра землетрясений [19–28, 46–48] на основе сейсмоинформации, полученной с помощью сети стандартных наземных сейсмостанций.

Известно [19–28, 46–48], что в этих случаях для определения эпицентра землетрясений используют разницу времен достижения основными сейсмическими волнами P (первичными) и S (вторичными) наземных сейсмических станций. Скорость распространения волн P выше, чем скорость распространения S волн. В гомогенной изотропной среде скорость волн P определяется выражением

$$v_P = \sqrt{k + \frac{4}{3}\mu} \quad (1)$$

где k — объемный коэффициент; μ — модуль сдвига; ρ — плотность материала, через который проходят волны.

Скорость распространения волн S можно определить по формуле

$$v_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

где μ — модуль сдвига; ρ — плотность материала, через который проходят волны. Расстояние от обыч-

ной наземной сейсмической станции до эпицентра находится умножением разности времени на разность скоростей:

$$S = \Delta T(v_P - v_S). \quad (3)$$

После определения расстояния между эпицентром и различными сейсмостанциями координаты эпицентра определяются геометрическим способом. Однако, к сожалению, во всех известных случаях в системах сейсмического мониторинга координаты эпицентров и гипоцентров определяются только после землетрясений [19–28].

Экспериментальные исследования показали, что в силу многих причин по полученным результатам на станциях RNM АСП вычисления координаты зоны АСП с применением указанной технологии практически невозможно.

В настоящей работе ставится задача создания интеллектуальной системы как для мониторинга зарождения АСП и выявления местонахождения зоны, так и для определения ориентировочного значения магнитуды ожидаемого землетрясения.

Технология определения информативных признаков скрытого периода зарождения АСП

Проведенные исследования показали, что при зарождении АСП в момент начала периода T_1 меняются оценки взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$, дисперсии помехи D_ε и значения помехо-корреляции $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0)$ [39–41]. Это связано с тем, что в начале периода T_1 помеха $\varepsilon(i\Delta t)$ формируется от влияния происходящих АСП. Поэтому в течение времени T_1 между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ возникает корреляция, и оценка $R_{X\varepsilon}(\mu)$ резко увеличивается. По этой причине можно считать, что оценка $R_{X\varepsilon}(\mu)$ является основным информативным признаком, который целесообразно использовать при мониторинге скрытого периода зарождения АСП.

Начиная с 1 июля 2010 г. для регистрации начала скрытого периода зарождения АСП на станциях RNM АСП были применены как традиционные технологии, так и робастные Noise-технологии. При этом с использованием традиционных корреляционных и спектральных технологий не удалось осуществить регистрацию времени T_1 с достаточной достоверностью и надежностью. В то же время при применении робастной Noise-технологии оценки взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu)$, помехо-корреляции $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu)$ и дисперсии помехи D_ε с началом времени T_1 резко менялись. Это оказалось решающим фактором, позволяющим безошибочно и с достаточной степенью надежности осуществить мониторинг начала зарождения АСП. Поэтому при создании сети станций RNM АСП именно оценки $R_{X\varepsilon}(\mu)$, $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu)$ и D_ε были выбраны в качестве информативных признаков для решения задачи мониторинга начала возникновения АСП.

В работе [39] предложено выражение для вычисления оценки релейной взаимно корреляционной функции $R_{X\epsilon}^*(\mu = 0)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и его помехой $\epsilon(i\Delta t)$ в следующем виде:

$$R_{X\epsilon}^*(\mu = 0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\text{sgng}(i\Delta t)g(i\Delta t) - 2\text{sgng}(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) + \text{sgng}(i\Delta t)g((i+2)\Delta t)], \quad (4)$$

где g — сейсмоакустический сигнал.

Также показано, что, располагая оценками $R_{X\epsilon}^*(\mu = 0)$, $R_{gg}^*(\mu = 1)$, $R_{gg}(\mu = 1)$ и используя равенство между соотношениями $R_{gg}^*(\mu = 1)/R_{gg}(\mu = 1)$ и $R_{X\epsilon}^*(\mu = 0)/R_{X\epsilon}(\mu = 0)$:

$$\frac{R_{gg}^*(\mu = 1)}{R_{gg}(\mu = 1)} = \frac{R_{X\epsilon}^*(\mu = 0)}{R_{X\epsilon}(\mu = 0)}, \quad (5)$$

по формуле

$$R_{X\epsilon}(\mu = 0) = \frac{R_{gg}(\mu = 1)R_{X\epsilon}^*(\mu = 0)}{R_{gg}^*(\mu = 1)} \quad (6)$$

можно определить оценку $R_{X\epsilon}(\mu = 0)$.

Эксперименты показали, что для повышения надежности и достоверности результатов мониторинга целесообразно в качестве дополнительных информативных признаков также использовать оценки помехокорреляции $R_{X\epsilon\epsilon}(\mu = 0)$ и дисперсии помехи D_ϵ , которые определяются по следующим выражениям [39–48]:

$$R_{X\epsilon\epsilon}(\mu) = R_{X\epsilon}(\mu) + D_\epsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g^2(i\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t) - 2g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t)], \quad (7)$$

$$D_\epsilon = R_{X\epsilon\epsilon}(\mu = 0) - R_{X\epsilon}(\mu = 0). \quad (8)$$

Таким образом, по формулам (4), (6)–(8) имеется возможность определения оценок $R_{X\epsilon}^*(\mu = 0)$, $R_{X\epsilon}(\mu = 0)$, $R_{X\epsilon\epsilon}(\mu = 0)$ и D_ϵ , с помощью которых можно осуществить мониторинг АСП с достаточной надежностью.

Интеллектуальная технология и система выявления местонахождения зоны зарождения АСП

Известно, что когда АСП достигает критического состояния, происходит землетрясение. Границы зоны и магнитуды землетрясения зависят от структуры и характера напряженно-деформированного состояния горных пород в данном конкретном месте. Деформация, происходящая скачкообразно, вызывает появление упругих волн. Объем деформируемых пород играет важную роль, определяя силу сейсмического толчка и формирование сейсмоакустического шума $g(i\Delta t)$. Каждому основному разрыву предшествует довольно длительное время T_1 подготовки землетрясения. Это время может продолжаться до нескольких десятков часов [39].

Анализ сейсмоакустической информации, полученной с помощью акустических датчиков, установленных на устьях законсервированных нефтяных скважин, показал, что при зарождении АСП распространение сейсмоакустического шума в глубинных пластах Земли на несколько десятков часов T_1 опережает ожидаемые землетрясения [39–41]. Экспериментально установлено, что мониторинг начала времени T_1 с применением технологии, описанной выше, достаточно надежно осуществляется станциями RNM АСП (рис. 1, см. вторую сторону обложки, и рис. 2) [39, 40]. Далее рассматривается возможность создания интеллектуальной технологии определения местонахождения зоны АСП с помощью информации, полученной от станций, построенных в девяти прикаспийских сейсмоактивных регионах, характеристики которых (географические координаты и глубины скважины) представлены в табл. 1.

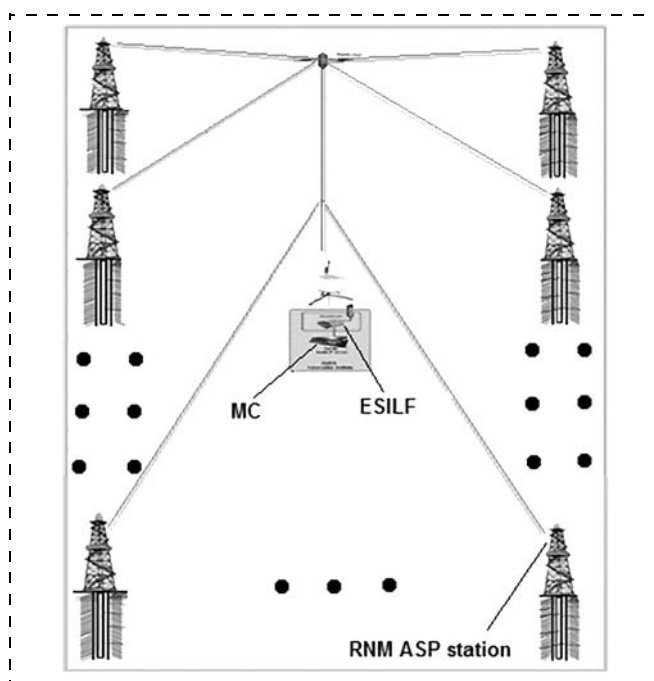


Рис. 2. Интеллектуальная сейсмоакустическая система выявления местонахождения зоны ожидаемого землетрясения

Таблица 1

Характеристики станций RNM АСП

№ пп	Название станции	Координаты станции		Глубина скважины	Начало работы станции
		Широта	Долгота		
1	Гум Адасы	40.310425°	50.008392°	3500 м	Июль 2010
2	Сиазань	41.046217°	49.172058°	3145 м	Ноябрь 2011
3	Нафталан	40.609521°	46.791458°	4000 м	Май 2012
4	Ширван	39.933170°	48.920745°	4900 м	Ноябрь 2011
5	Нефтчала	39.358333°	49.246667°	1430 м	Июнь 2012
6	Нахичеван	39.718000°	44.876000°	1800 м	Март 2013
7	Газах	41.311889°	45.100278°	200 м	Август 2013
8	Туркмен01	38.530089°	56.654472°	300 м	Август 2013
9	Кибернетик (Баку)	40.375700°	49.810833°	10 м	Февраль 2014

Эксперименты, проводимые на станциях RNM АСП, показали, что сейсмоакустические шумы, которые принимаются из глубин Земли гидрофонами, установленными на устьях скважин, являются прямыми и непосредственными предвестниками процесса подготовки землетрясений.

Результаты измерения и анализа этих шумов на каждой станции по спутниковой связи передаются на сервер центра сейсмоакустического мониторинга (ЦМ). В системе также предусмотрена возможность передачи полученных результатов на сервер ЦМ других соседних стран сейсмоактивных регионов.

Начиная с июля 2010 г. для проведения широкомасштабных экспериментов по мониторингу АСП, как это показано на рис. 1, поочередно были введены в эксплуатацию станции RNM АСП Гум Адасы (Каспийское море), Ширван, Сиязань, Нафталан, Нефчала, Нахичевань (на границах Ирана и Турции), Туркмен01 (Туркменистан), Газах (на границе Грузии), Кибернетик (Баку). Последние три станции построены на водяных скважинах глубиной 300, 200 и 10 м соответственно. Станции строятся на тех скважинах, где трубы самотеком заполняются водой. Гидрофоны опускаются на глубину 10...20 м от уровня водяного столба. Анализ сейсмоакустических сигналов, полученных этими станциями, показал, что при зарождении АСП возникают сейсмоакустические шумы, которые распространяются в радиусе более 300...500 км на несколько десятков часов раньше, чем сейсмические волны, которые регистрируются наземными сейсмостанциями.

В процессе функционирования сети станций RNM АСП проводится синхронный робастный Noise-анализ сейсмоакустических сигналов, получаемых от всех станций по спутниковой связи (рис. 2). При этом через каждые 5 с в сервер центра мониторинга от станций передаются оценки Noise-характеристик $R_{\chi\epsilon}(\mu)$, $R_{\chi\epsilon\epsilon}(\mu)$, D_ϵ . По их изменениям, например, для i -й и j -й станции осуществляется индикация начала времени зарождения АСП T_{1i} , T_{1j} .

Результат эксплуатации этих станций показал, что каждая из них в отдельности дает возможность надежно осуществить индикацию процесса зарождения АСП, предшествующих землетрясению [39]. Кроме того, полученные результаты с помощью сети станций RNM АСП открывают возможность создания интеллектуальной технологии выявления местонахождения зоны ожидаемого землетрясения. Для этого сначала с помощью сети этих станций определяются комбинации времени индикации T_{1i} , T_{1j} , которые в сочетании с координатами расположения станций представляют собой исходные данные для решения задачи определения местонахождения зоны АСП. При этом для повышения степени достоверности и надежности полученных результатов, кроме комбинации времени индикации, в качестве исходных данных также целесообразно использовать разности времени $T_{1i} - T_{1j}$ для каждой выбранной пары станций. Другими словами, для решения рассматриваемой задачи в качестве исходных данных,

кроме комбинации T_{1i} , T_{1j} , также целесообразно определять разность времени индикации АСП между станциями, т. е. разности $\Delta\tau_{ij} = T_{1i} - T_{1j}$.

Эксперименты показали, что по значениям оценок Noise-характеристик трудно определить начало времени индикации T_{1i} с достаточной точностью. Поэтому, учитывая важность и необходимость повышения точности его определения, в предлагаемой системе предусмотрено дублирование процесса определения разности времени $\Delta\tau_{ij} = T_{1i} - T_{1j}$. Для этого целесообразно последнюю дополнительно определять по экстремальному значению оценки взаимно корреляционной функции $R_{g_i g_j}(\mu_{\max})$ между сигналами $g_i(i\Delta t)$ и $g_j(i\Delta t)$, получаемыми от различных комбинаций станций RNM АСП по следующим выражениям:

$$R_{g_i g_j}(\mu_{\max}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_i(i\Delta t) g_j(i + \mu)\Delta t, \quad (9)$$

$$R_{g_i g_j}(\mu_{\max}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_i^2(i\Delta t) g_j^2(i + \mu)\Delta t, \quad (10)$$

$$R_{g_i g_j}^*(\mu_{\max}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_i(i\Delta t) g_j^2(i\Delta t). \quad (11)$$

При этом процедура определения разности времени мониторинга между различными станциями в сервере ЦМ заключается в следующем:

- 1) сначала определяется время регистрации начала времени T_{1i} зарождения АСП на первой станции Гум Адасы;
- 2) затем определяются времена мониторинга для второй (Ширван), третьей (Сиязань), четвертой (Нафталан) и т. д. станций;
- 3) далее, по выражениям (9)–(11) определяется множество оценок взаимно корреляционных функций $R_{g_i g_j}(i\Delta t)$, $R_{g_i g_j}^*(i\Delta t)$, из которых выбираются те временные сдвиги $\mu\Delta t$, на которых кривая взаимно корреляционной функции имеет пиковое (экстремальное) значение. По ним определяются разности времени регистрации АСП i -й и j -й станций $\Delta\tau_{ij} = T_{1i} - T_{1j}$;
- 4) найденные временные разности $\Delta\tau_{ij}$ используются как исходные данные при определении зоны местоположения АСП.

Таким образом, в предлагаемой системе оценки Noise-характеристик $R_{\chi\epsilon}(\mu)$, $R_{\chi\epsilon\epsilon}(\mu)$ и D_ϵ , получаемых в результате мониторинга АСП станциями RNM АСП Гум Адасы, Ширван, Сиязань, Нафталан, Нефчала и Нахичевань, Туркмен01 (Туркменистан), Газах и Кибернетик (г. Баку), через спутниковую связь синхронно передаются на сервер ЦМ. По полученным результатам мониторинга формируются как комбинации последовательности времен индикации T_{1i} , T_{1j} , так и комбинации разности времен $\Delta\tau_{ij}$, которые используются как исходные данные для определения местонахождения ожидаемого землетрясения.

Эксперименты, проводимые в июне—июле 2010 г. на указанных станциях, показали, что в Азербайджане и близлежащих регионах в радиусе 300...500 км вокруг сети станций RNM АСП имеются следующие активные зоны землетрясений:

- 1) Туркменская сторона Каспийского моря;
- 2) в Каспийском море южнее Апшеронского полуострова;
- 3) в Каспийском море севернее Апшеронского полуострова;
- 4) в Ширванской зоне Азербайджана;
- 5) в северо-западной зоне Азербайджана;
- 6) в Южной зоне Азербайджана;
- 7) на юге Кавказского региона Российской Федерации;
- 8) на северо-востоке Ирана;
- 9) в северо-западном регионе Ирана (в окрестностях Тебриза);
- 10) на границе Ирана, Ирака и Турции;
- 11) северный регион Ирана;
- 12) восточный регион Турции;
- 13) западная зона Грузии (Черное море).

Некоторые результаты регистрации АСП в этих зонах станциями RNM АСП приведены в работе [39].

В этих зонах в последние полтора—два года произошли многочисленные землетрясения магнитудой более 3...4 баллов. При этом для каждой зоны комбинации последовательности времени регистрации АСП станциями Гум Адасы, Ширван, Сиязань, Нефтчала, Нафталан и Нахичевань практически повторялись. Проведенный анализ записи графиков показал, что каждая комбинация последовательности времени индикации текущих АСП соответствует одному из конкретных очагов землетрясений. Сотрудники, занимающиеся вопросом интерпретации результатов проводимых экспериментов более двух лет, по этим комбинациям времени научились интуитивно, практически безошибочно выявлять местонахождения зоны ожидаемого землетрясения. При этом стала очевидной целесообразность выявления местонахождения зоны ожидаемого землетрясения с помощью экспертных систем. Так естественным образом возникла проблема создания соответствующей экспертной системы, которая позволила бы сейсмологам использовать сеть станций RNM АСП как эффективный инструмент при определении местонахождения зоны ожидаемого землетрясения. Основу предложенного в данной работе экспериментального варианта подобной экспертной системы выявления местонахождения зоны (ЭСВМЗ) АСП составляет база знаний (БЗ), которая сформирована из совокупности множеств $W_1, W_2, W_3, \dots, W_{13}$ местонахождения соответствующих очагов. Элементы каждого из этих множеств сформированы по записям графиков, где, начиная с июля 2010 г. по настоящее время, станциями RNM АСП зарегистрированы параметры всех землетрясений во всех указанных выше тринадцати очагах. Каждый элемент множества $W_i, i = 1, 2, \dots, 13$, состоит из комбинации последовательности времени индикации АСП стан-

циями T_{1i}, T_{1j} , из комбинации разности времен индикации $\Delta\tau_{ij}$, а также из комбинации оценок взаимно корреляционной функции $R_{X\epsilon}(\mu = 0)$. Кроме того, в каждый элемент БЗ также занесена магнитуда M_i , которая была определена при соответствующих землетрясениях наземными сейсмостанциями. Одновременно с этим в каждом элементе отмечена дата землетрясения. Для случая, когда в каждом множестве $W_i, i = 1, 2, \dots, 13$, имеется только один элемент, БЗ имеет следующий вид:

$$W_1 \left\{ \begin{array}{ccccc} T_{11}^1 & T_{12}^1 & \dots & T_{19}^1 & M_1 \\ \Delta\tau_{12}^1 & \Delta\tau_{13}^1 & \dots & \Delta\tau_{19}^1 & M_1 \\ R_{1X\epsilon}^1(\mu = 0) & R_{2X\epsilon}^1(\mu = 0) & \dots & R_{9X\epsilon}^1(\mu = 0) & M_1 \end{array} \right\};$$

$$W_2 \left\{ \begin{array}{ccccc} T_{11}^2 & T_{12}^2 & \dots & T_{19}^2 & M_2 \\ \Delta\tau_{12}^2 & \Delta\tau_{13}^2 & \dots & \Delta\tau_{19}^2 & M_2 \\ R_{1X\epsilon}^2(\mu = 0) & R_{2X\epsilon}^2(\mu = 0) & \dots & R_{9X\epsilon}^2(\mu = 0) & M_2 \end{array} \right\};$$

.....

$$W_{13} \left\{ \begin{array}{ccccc} T_{11}^{13} & T_{12}^{13} & \dots & T_{19}^{13} & M_{13} \\ \Delta\tau_{12}^{13} & \Delta\tau_{13}^{13} & \dots & \Delta\tau_{19}^{13} & M_{13} \\ R_{1X\epsilon}^{13}(\mu = 0) & R_{2X\epsilon}^{13}(\mu = 0) & \dots & R_{9X\epsilon}^{13}(\mu = 0) & M_{13} \end{array} \right\}.$$

Каждое множество $W_i, i = 1, 2, \dots, 13$, экспериментального варианта БЗ состоит из нескольких десятков таких элементов, и при каждом новом землетрясении они дополняются новыми элементами. В процессе эксплуатации экспертной системы (ЭС) по завершении процесса мониторинга и индикации времени начала текущего АСП станциями формируются текущие комбинации последовательности времени индикации T_{1i}, T_{1j} , комбинации разности времен индикации $\Delta\tau_{ij}$. Также формируются комбинации оценок $R_{X\epsilon}(\mu)$.

Начиная с января 2014 г., экспериментальная фаза выявления местонахождения зоны землетрясения проводится с помощью ЭСВМЗ. Этот процесс осуществляется следующим образом. На основе результатов мониторинга на сети станций RNM АСП формируется текущий элемент. Затем на блоке идентификации экспертной системы (БИЭС) он сравнивается со всеми элементами множеств $W_1, W_2, W_3, \dots, W_{13}$. При его совпадении с одним из элементов какого-то множества по его номеру осуществляется идентификация местонахождения зоны ожидаемого землетрясения. В блоке принятия решений (БПР) ЭСВМЗ запоминается номер зоны АСП. Одновременно с этим в это множество БЗ дополнительно вносится текущий элемент. Тем самым, в процессе эксплуатации ЭСВМЗ в БЗ все время записываются новые элементы. Таким образом, сеть станций RNM АСП в сочетании с ЭСВМЗ функционирует как единая система.

В целях проверки достоверности и надежности результатов выявления местонахождения зоны зарождения АСП было проведено испытание описанной ЭСВМЗ при всех последующих землетрясениях. Полученные результаты показали реальную возможность практического применения экспериментального варианта ЭСВМЗ для выявления местонахождения зоны АСП, что создает предпосылки для использования рассматриваемой системы как инструментария при определении местонахождения зоны ожидаемого землетрясения. Принимая во внимание такую перспективу, в перечень основных функций БПР ЭСВМЗ дополнительно была включена функция формирования и представления информации сейсмологам в следующем формате:

1. Дата текущей АСП и номер зоны ожидаемого землетрясения.
2. Результаты текущего мониторинга станциями RNM АСП.
3. Предполагаемый период опережения начала времени мониторинга АСП по сравнению с временем регистрации ожидаемого землетрясения наземными сейсмостанциями.
4. Перечень всех элементов, которые ранее были зарегистрированы в соответствующем множестве при возникновении предыдущих АСП в предполагаемом очаге местонахождения ожидаемого землетрясения (с датами).
5. Число элементов, которые совпадают с текущим.
6. Магнитуды ранее происходивших землетрясений.
7. Минимальная магнитуда ожидаемого землетрясения.
8. В случае отсутствия в БЗ элементов, совпадающих хотя бы с некоторыми элементами в множествах $W_1, W_2, W_3, \dots, W_{13}$, на БПР формируется информация о невозможности выявления зоны землетрясения.

Технология определения приближенного значения магнитуды ожидаемого землетрясения с применением нейронной сети

Анализ результатов эксперимента по определению местонахождения зоны АСП показал, что, зная текущие оценки $R_{X\epsilon}(\mu)$, $R_{X\epsilon\epsilon}(\mu)$, D_ϵ и расстояние от зоны до станций RNM АСП, с применением нейронных сетей можно определить приближенное значение минимальной магнитуды ожидаемого землетрясения. Исследования показали, что для этой цели можно использовать нейронные сети, которые приведены в работах [47, 48]. При этом оказалось, что для обучения нейронной сети целесообразно использовать информацию, содержащуюся в множествах $W_1, W_2, W_3, \dots, W_{13}$. На рис. 3 приведена схема структуры нейронной сети ($N_3 = 1$), которая функционирует следующим образом. Из БЗ содержимые соответствующих элементов множеств $W_1, W_2, W_3, \dots, W_{13}$ поочередно передаются на входы $x_1, x_2, \dots, x_{N_1}$ нейрона, т. е. на входы нейрона поочередно посту-

пают соответствующие комбинации времени индикации АСП T_{1ij} , разности времени индикации Δt_{ij} и оценка $R_{X\epsilon}(\mu = 0)$, на выходе нейрона устанавливается магнитуда M_1 землетрясения, которая была зарегистрирована наземными сейсмостанциями. Процесс обучения проводится последовательно с 1-го по 13-й очаг землетрясения. Например, при обучении нейрона применительно к третьему очагу, т. е. при землетрясении в очаге в Каспийском море, на входы нейрона из БЗ последовательно передаются полученные результаты мониторинга от станций Сиязань, Гум Адасы, Нефтчалы и Копетдаг (Туркменская), а на выходе используется значение магнитуды M_3 . При обучении нейрона для определения магнитуды в 12-м очаге, т. е. в Восточной Турции, на входы нейрона передаются данные мониторинга станций Газах, Нафталан, Ширван и Нахичевань и на выходе используется магнитуда M_{12} . Таким образом, при обучении нейронной сети используются ранее зарегистрированные параметры мониторинга АСП станциями RNM АСП. Одновременно с этим по координатам местонахождения зоны землетрясения в БПР определяются приблизительные расстояния S_1 между станциями и зонами, которые также передаются во входы нейронной сети. В результате нейронная сеть по исходным данным, записанным в элементах множеств $W_1, W_2, W_3, \dots, W_{13}$, и по расстоянию зоны АСП до каждой станции $S_1, \dots, S_9$ обучается для определения приближенной магнитуды ожидаемого землетрясения. Благодаря этому после этапа обучения в процессе текущего мониторинга АСП с помощью сети станций RNM АСП при передаче на входы нейрона текущих комбинаций соответствующих оценок на выходе y_3 [1] сети формируется код соответствующей приближенной магнитуды M ожидаемого землетрясения. Этот результат передается на вход БПР ЭСВМЗ.

В процессе эксплуатации нейронной сети и экспертной системы каждый раз после выявления ме-

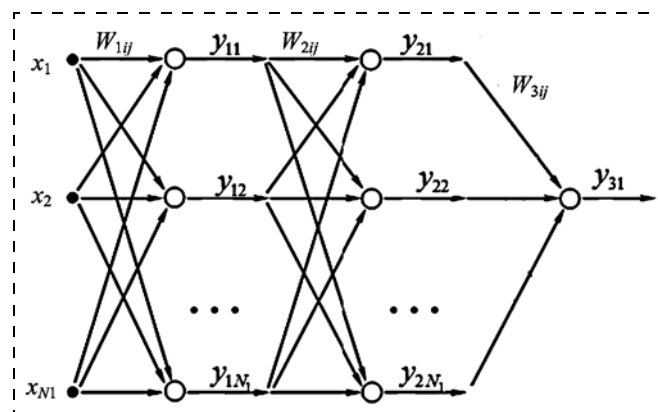


Рис. 3. Структура нейронной сети интеллектуальной сейсмоакустической системы ($x_1, x_2, \dots, x_{N_1}$ — входные значения, W_{1ij} — весовые коэффициенты для первого слоя, W_{2ij} — весовые коэффициенты для второго слоя, W_{3ij} — весовые коэффициенты для третьего слоя, y_{ij} — значений функций активизации)

стонахождения и приблизительной магнитуды каждого ожидаемого землетрясения полученный результат сравнивается с координатами и магнитудами реальных землетрясений, которые регистрируются на наземных сейсмостанциях. Полученная разность в дальнейшем используется как для коррекции БЗ, так и для обучения нейронной сети. Благодаря этому база знаний с течением времени совершенствуется, и степень обучения нейронной сети все время улучшается. В результате появляется возможность повысить надежность, достоверность и адекватность выявления как местонахождения, так и магнитуды ожидаемого землетрясения.

Анализ опыта применения экспертной системы и нейронной сети при определении местонахождения зоны ожидаемого землетрясения показал, что для повышения надежности и достоверности полученных результатов необходимо увеличение числа станций RNM АСП. Учитывая это, с начала 2013 г. была введена в эксплуатацию станция в Нахичеванской автономной области вблизи границы с Турцией и Ираном (см. рис. 1), а также станция Копетдаг в Туркменистане (см. рис. 1). Кроме того, в июле 2013 г. была построена станция в Казахском районе на границе с Грузией (см. рис. 1) и в Институте кибернетики (г. Баку). Следует отметить, что результаты мониторинга на станции, построенной в подвале Института кибернетики, на глубине скважины 10 метров практически совпадали с показаниями станции Гум Адасы, которая построена на скважине с глубиной 3500 м.

Результаты выявления очагов ожидаемых землетрясений интеллектуальной системой в первом полугодии 2014 г.

Опытные испытания рассматриваемой системы начаты в июне 2014 г. За это время при выявлении зоны некоторые ошибки были обнаружены при землетрясениях менее 2,5...3,5 балла. Кроме того, при сбое в системе электропитания, в системе связи и также при неисправности гидрофона, контроллера и других узлов одновременно на двух—трех станциях RNM АСП также были обнаружены ошибочные результаты выявления зоны ожидаемого землетрясения. В результатах выявления местонахождения зоны ожидаемого землетрясения с мощностью более 5 баллов при нормальном состоянии функционирования всех станций RNM АСП ошибки не были обнаружены.

Перечень очагов местонахождения ожидаемых землетрясений, выявленных интеллектуальной сейсмоакустической системой по заархивированным результатам мониторинга в 2013—2014 гг., занимает много места. Поэтому в табл. 2—4 приводятся результаты 11 выявленных очагов ожидаемых землетрясений с января 2013 г. по июль 2014 г. с магнитудой, превышающей 5 баллов. В табл. 2 представлены данные результатов выявления очагов ожидаемых землетрясений, взятые с сайта Euro-Mediterranean

Seismological Centre по ссылке <http://www.emsc-csem.org/#2>. Здесь приведены: местонахождение, время (UTC — универсальное координированное время), координаты (широта и долгота), магнитуды (в единицах ML, mb, Mw) и глубина эпицентра землетрясений. В табл. 3 приведены значения разности времени индикации АСП между станциями RNM АСП, а в табл. 4 — значения Noise-характеристик начала процесса зарождения АСП. Знак "*" в табл. 3 означает, что данная станция RNM АСП слабо реагировала при зарождении АСП ожидаемого землетрясения, а знак "-" в табл. 4 означает, что значение зарегистрированной оценки $R_{\chi_e}(\mu)$ меньше порогового уровня.

Для иллюстрации на рис. 4 и 5 (см. вторую сторону обложки) представлены записи графиков АСП, которые предшествовали двум из указанных землетрясений (по вертикальной оси на всех рисунках отложена помехокорреляция $R_{\chi_{ee}}(\mu = 0)$, по горизонтальной оси — время).

В первых строках табл. 2—4 приведены результаты выявления зоны очага землетрясения, которое произошло в Грузии 26 марта 2013 г. Здесь временное распределение индикации начала станциями RNM АСП имело следующую последовательность: Siyezen — 04:15; Qum Adasy — 04:30; Shirvan — 06:50; Neftchala — 08:30. Системой выявлено, что это соответствует седьмому очагу ожидаемых землетрясений, причем здесь время опережения до землетрясения составило 8...10 часов.

Во вторых строках табл. 2—4 представлены результаты выявления зоны очага землетрясения, которое произошло в Грузии 27 и 28 мая 2013 г. Здесь станциями RNM АСП (Siyezen, Naftalan, Shirvan и Qum Adasy) более чем за 20 ч до начала землетрясения было зарегистрировано зарождение АСП. На рис. 4 приведены графики АСП, из которых видно, что северные (Siyezen) и северо-западные (Qum Adasy) станции зафиксировали аномалии раньше других. При этом имело место следующее временное распределение индикации начала станциями: Naftalan — 07:30; Siyezen — 09:10; Shirvan — 09:45; Qum Adasy — 11:40. Благодаря этому очаг землетрясения был выявлен системой примерно к 18 ч бакинского времени, что почти на 10...11 ч опередило время регистрации данных землетрясений наземными станциями.

В третьей и четвертой строках табл. 2—4 приведены результаты выявления зоны очага землетрясений, которые произошли 16 октября 2013 г. на юге России. Здесь зарождение АСП имело место на юго-востоке Кавказского региона, что было зарегистрировано станциями RNM АСП в следующей последовательности: Siyezen — 05:30, Qum Adasy — 08:00, Qazax — 10:00, Neftchala — 14:30. На основе этой комбинации временного распределения регистрации системой был выявлен седьмой очаг землетрясения, который соответствует северо-востоку Азербайджана, где действительно в 16—17 ч по Бакинскому времени произошло землетрясение.

Время выявления зоны очага опережало землетрясение примерно на 15 ч.

В пятых строках табл. 2—4 показаны результаты выявления зоны очага землетрясений, которое произошло 21 ноября 2013 г. на границе Иран—Ирак. Здесь, по результатам регистрации станциями RNM АСП: Naxchvan — 08:00; Qum Adasy — 09:00; Neftchala — 08:50, системой выявлен очаг ожидаемого землетрясения на 12 ч с опережением.

В шестых строках табл. 2—4 приведен результат выявления системой 9 января 2014 г. местонахождения зоны очага землетрясения, которое произошло на Caspian Sea, Offshore Azerbaijan, и было зарегистрировано станциями RNM АСП (Turkmen01 — 09:15, Qum Adasu — 09:25, Siyezen — 09:45 и Neftchala — 11:15) за 16 ч до землетрясения.

В седьмых строках табл. 2—4 представлен результат выявления системой очага ожидаемого землетрясения, которое произошло 13 января 2014 г. в Туркменистане. Система по комбинациям последовательности времен индикации станциями RNM АСП (Neftchala — 09:30, Siyezen — 10:45 и Qum Adasy — 11:30) показала местонахождение ожидаемого землетрясения в Туркменистане, т. е. в первом очаге. Время выявления очага ожидаемого землетрясения опережало время его регистрации более чем на 24 ч.

В восьмых строках табл. 2—4 приводятся результаты выявления зоны очага землетрясения, которое произошло 28 января 2014 г. на Западе Ирана. Здесь имела место комбинация времен регистрации станциями RNM АСП (Qum Adasy — 09:45, Shirvan — 07:30, Naxchvan — 04:50 и Neftchala — 11:20), позволившая выявить девятый очаг местонахождения ожидаемого землетрясения.

В девятых строках табл. 2—4 представлены результаты выявления зоны очага землетрясения, которое произошло в Азербайджане 9 и 10 февраля 2014 г. На рис. 5 приведены графики соответствующих АСП, из которых видно, что временное распределение их индикации станциями RNM АСП имеет следующую последовательность: Qum Adasy — 17:45, Shirvan — 12:45, Qazax — 19:00 и Naxchvan — 18:30, что дало возможность системе определить номер зоны очага (4) ожидаемого землетрясения системой с опережением времени регистрации землетрясения на 19 ч.

В десятых строках табл. 2—4 приведены результаты выявления зоны очага землетрясения, которое произошло 6 и 7 июня 2014 г. на Offshr Turkmenistan. В одиннадцатых строках табл. 2—4 приведена информация, соответствующая выявлению местонахождения ожидаемого землетрясения, которое произошло в первом очаге в Азербайджане 29 июня

Таблица 2
Результаты выявленных очагов ожидаемых землетрясений

№	Дата и время землетрясения	Широта и долгота землетрясения	Магнитуды и глубина эпицентра землетрясения	Местонахождение зоны очагов землетрясения
1	2013-03-26 23:35:24.0 UTC	43.219 N 41.637 E	mb 5.1 10 km	Georgia (Sak'art'velo)
2	2013-05-28 00:09:52.0 UTC	43.22 N 41.58 E	mb 5.2 2 km	Georgia (Sak'art'velo)
3	2013-09-17 04:09:14.0 UTC	42.17 N 45.89 E	mb 5.0 10 km	Caucasus Region, Russia
4	2013-09-17 04:09:13.0 UTC	42.13 N 45.80 E	Mw 5.1 2 km	Caucasus Region, Russia
5	2013-11-24 18:05:41.0 UTC	34.06 N 45.52 E	mb 5.6 2 km	Iran-Irag Border
6	2014-01-10 00:45:32.0 UTC	41.77 N 49.31 E	ML 5.0 87 km	Caspian Sea, Offshore Azerbaijan
7	2014-01-14 13:55:02.0 UTC	40.38 N 52.97 E	mb 5.1 50 km	Turkmenistan
8	2014-01-28 23:47:38.0 UTC	32.52 N 49.98 E	ML 5.1 33 km	Western Iran
9	2014-02-10 12:06:48.0 UTC	40.23 N 48.63 E	Mw 5.4 55 km	Azerbaijan
10	2014-06-07 06:05:32.1 UTC	40.32 N 51.55 E	mb 5.6 50 km	Offshr Turkmenistan
11	2014-06-29 17:26:10.4 UTC	41.62 N 46.68 E	mb 5.1 20 km	Azerbaijan

Таблица 3
Значения разности времени индикации АСП между станциями RNM АСП

№	$\Delta\tau_{12}$	$\Delta\tau_{13}$	$\Delta\tau_{14}$	$\Delta\tau_{15}$	$\Delta\tau_{16}$	$\Delta\tau_{17}$	$\Delta\tau_{18}$	$\Delta\tau_{19}$
1	35	-120	—	135	*	—	*	—
2	-115	-150	-250	—	*	—	*	—
3	—	-150	—	390	*	120	*	—
4	—	-150	—	390	*	120	*	—
5	—	*	—	-10	-60	*	*	—
6	—	20	—	110	*	—	-10	—
7	—	-45	*	-120	*	*	—	—
8	-135	—	—	100	-300	—	—	—
9	-300	—	—	—	45	75	—	—
10	145	20	—	-70	—	—	—	120
11	305	-85	—	—	—	315	*	—

Таблица 4
Значения Noise характеристик начала процесса зарождения АСП

№	R_{1X_6}	R_{2X_6}	R_{3X_6}	R_{4X_6}	R_{5X_6}	R_{6X_6}	R_{7X_6}	R_{8X_6}	R_{9X_6}
1	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	300	50	100	—	140	—	—	—	—
2	150	150	160	250	—	—	—	—	—
3	100	—	40	—	80	—	80	—	—
4	100	—	40	—	80	—	80	—	—
5	160	—	—	—	150	250	—	—	—
6	110	—	110	—	110	—	—	40	—
7	160	—	100	—	120	—	—	—	—
8	120	110	—	—	—	180	—	—	—
9	75	130	—	—	—	260	230	—	—
10	80	25	40	—	100	—	—	—	80
11	100	20	120	—	—	—	25	—	—

2014 г. Здесь последовательность индикаций начала аномалий станциями RNM АСП (Siyezen — 00:50, Qum Adasy — 02:15, Shirvan — 07:20, Qazax — 07:30) позволила системе выявить местонахождение зоны очага ожидаемого землетрясения (Азербайджан).

Заключение

1. Интеллектуальная система, сформированная на основе сети сейсмоакустических станций RNM АСП и экспертной системы в сочетании с нейронной сетью, может быть использована как эффективный инструмент для выявления местонахождения зоны очага ожидаемого землетрясения. При этом сейсмологу представляется информация, которая содержит номер зоны очага ожидаемого землетрясения, текущие комбинации параметров АСП, число, перечень, даты и магнитуды аналогичных комбинаций, которые были зарегистрированы в данном очаге при прошлых землетрясениях. Представленная информация позволяет оценивать степень достоверности полученного результата о местонахождении зоны очага ожидаемого землетрясения. Наличие достаточного времени до землетрясения дает возможность, в случае сомнения, привлечь к экспертной оценке других сейсмологов и исключить случайную ошибку.

2. Поскольку предложенная сеть станций RNM АСП построена на скважинах с различными глубинами, то все они имеют различные характеристики. Их трудно учесть как при идентификации и выявлении местонахождения зоны очага ожидаемого землетрясения, так и при определении его магнитуды. Кроме этого, стоимость скважины с увеличением глубины резко возрастает. Например, стоимость бурения скважины глубиной 4000...5000 м составляет 20...30 млн долларов. Поэтому для тех стран, где нет законсервированных нефтяных скважин, построение станций RNM АСП будет проблематично.

В связи с этим, в дальнейшем рекомендуется создание сети станций, построенных на водяных скважинах глубиной 50...100 м. При этом гидрофоны рекомендуется погружать на глубину 10...20 м. Для повышения достоверности и надежности результата определения местонахождения зоны очага ожидаемого землетрясения целесообразно строить сеть из большего числа станций (более 10...15), на скважинах с одинаковой глубиной, расположенных на равных расстояниях. Путем интеграции по спутниковой связи сетей станций RNM АСП стран нескольких соседних сейсмоактивных регионов в перспективе можно повысить степень достоверности и надежность определения координаты местонахождения ожидаемого землетрясения.

3. Эксперименты показали, что с увеличением мощности землетрясения улучшается надежность результатов мониторинга соответствующих АСП и повышается степень достоверности результатов выявления местонахождения зоны очага ожидаемого

землетрясения. При мощности более 5 баллов практически во всех случаях результат выявления местонахождения ожидаемого землетрясения оказался достоверным. При этом оценка взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ по мере удаления от зоны очага землетрясения уменьшается. Оценка дисперсии помехи D_ε , наоборот, по мере удаления от зоны очага увеличивается. Соотношение $R_{X\varepsilon}(\mu)/R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu)$ по мере удаления уменьшается, а $D_\varepsilon/R_{\varepsilon\varepsilon}$ — увеличивается. В различных грунтах, например, в воде, в песке, в глине и т. д., разница скорости распространения сейсмоакустического шума значительно отличается. При этом между глубиной скважин и дальностью радиуса мониторинга АСП имеется корреляционная связь.

4. Эксперименты на станции "Гум Адасы" в Каспийском море показали, что радиус мониторинга этой станции значительно шире, чем станций, которые расположены далеко от Каспийского моря. Другие станции в Сиязане и в Нефтчале, расположенные вблизи Каспийского моря, также имеют относительно других станций больший радиус мониторинга. Практически все сейсмические процессы, которые достигают Каспийского моря, четко регистрируются этими станциями. Следовательно, при создании сетей новых станций надо принимать во внимание, что море является "идеальным проводником" сейсмоакустических шумов, возникающих при зарождении АСП в регионе.

5. По результатам, полученным на основе экспериментальных данных, можно предположить, что время опережения регистрации зарождения АСП сейсмоакустической станцией RNM АСП по сравнению со стандартной сейсмоаппаратурой обусловлено двумя факторами.

Во-первых, сейсмоакустические волны, возникающие в начале зарождения АСП, из-за частотных характеристик некоторых верхних пластов не доходят до поверхности Земли. Это способствует их распространению в глубинных пластах в горизонтальном направлении в виде шума. При этом, когда они достигают стальных труб скважины, сейсмоакустические волны преобразовываются в акустические сигналы и передаются со скоростью звука на поверхность Земли, где улавливаются с помощью гидрофона. В то же время низкочастотные сейсмические волны от сейсмопроцессов ощущаются на поверхности Земли через определенный промежуток времени, когда уже происходит землетрясение. Поэтому они регистрируются сейсμοприемниками стандартной наземной аппаратуры заметно позже.

Во-вторых, применение Noise-технологий путем анализа сейсмоакустического шума при появлении взаимосвязи между полезным сигналом и помехой фиксирует АСП в начале их зарождения. Благодаря этим двум факторам на станциях RNM АСП осуществляется индикация начала зарождения аномалии значительно раньше станций сейсмслужбы.

6. Сейсмоакустические станции мониторинга АСП также могут быть использованы для мониторинга скрытого периода процесса формирования вулканов значительно раньше их извержения. Кроме того, их применение также позволит осуществить мониторинг испытания больших и малых атомных бомб, а также других экспериментов, связанных с производством военной техники в масштабе регионов.

Список литературы

1. **Kanamori H., Brodsky E. E.** The physics of earthquakes // Reports on progress in physics. 2004. 67. P. 1429–1496.
2. **Tothong P., Cornell C. A.** An Empirical Ground-Motion Attenuation Relation for Inelastic Spectral Displacement // Bulletin of the Seismological Society of America. 2006. 96. P. 2146–2164.
3. **Ghahari F., Jahankhah H., Ghannad M. A.** Study on elastic response of structures to near-fault ground motions through record decomposition // Soil dynamics and earthquake engineering. 2010. 30. P. 536–546.
4. **Boore D. M., Bommer J. J.** Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2005. 25. P. 93–115.
5. **Galiana-Merino J. J., Parolai S., Rosa-Herranz J.** Seismic wave characterization using complex trace analysis in the stationary wavelet packet domain // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2011. 31. P. 1565–1578.
6. **Yee E., Stewart J. P., Schoenberg F. P.** Characterization and utilization of noisy displacement signals from simple shear device using linear and kernel regression methods // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2011. 31. P. 25–32.
7. **Pavlović V. D., Veličković Z. S.** Measurement of the seismic waves propagation velocity in the real medium // The scientific journal Facta Universitatis Series: Physics, Chemistry and Technology. 1998. 1. P. 63–73.
8. **Wang Y., Lu J., Shi Y., Yang C.** PS-wave Q estimation based on the P-wave Q values // Journal of geophysics and engineering. 2009. 39. P. 386–389.
9. **Mallat S. G.** A Theory of Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1989. 11 (7). P. 674–693.
10. **Vidakovic B., Lozoya C. B.** On time-dependent wavelet denoising // IEEE Transaction on Signal Processing. 1998. V. 46. N. 9. P. 2549–2554.
11. **Colak O. H., Destici T. C., Ozen S., Arman H., Cerezci O.** Frequency-energy characteristics of local earthquakes using discrete wavelet transform // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2006. 20. P. 38–41.
12. **Hutton D. V.** Fundamentals of finite element analysis. McGraw-Hill, 2004.
13. **Kislov K. V., Gravirov V. V.** Earthquake Arrival Identification in a Record with Technogenic Noise // Seismic Instruments. 2011. V. 47. N. 1. P. 66–79.
14. **Descherevsky A. V., Lukk A. A., Sidorin A. Y., Vstovsky G. V., Timashev S. F.** Flicker-noise spectroscopy in earthquake prediction research // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2003. 3. P. 159–164.
15. **Kossobokov V. G.** Testing earthquake prediction methods: the West Pacific short-term forecast of earthquakes with magnitude $M_{wHRV} \geq 5.8$ // Tectono-physics. 2006. 413. P. 25–31.
16. **Shebalin P., Keilis-Borok V., Gabrielov A., Zaliapin I., Turcotte D.** Short-term earthquake prediction by reverse analysis of lithosphere dynamics // Tectonophysics. 2006. 413. P. 63–75.
17. **Larionov I. A., Sherbina A. O., Mishenko M. A.** Geoacoustic emissions response on the process of earthquake preparation at different observation points. Bulletin of KRAESC. Earth Sciences. 2005. 6. 108–115.
18. **Aliev T. A., Alizada T. A., Abbasov A. A.** Method for monitoring the beginning of anomalous seismic process. International Application No PCT/AZ2005/000006, Pub. No WO2006/130933, International Filing Date — December 19, 2005.
19. **Aliev T. A., Abbasov A. A., Aliev E. R., Guluev G. A.** Method for monitoring and forecasting earthquakes. International Application No PCT/AZ2006/00000, Pub. No WO2007/143799, International Filing Date — June 16, 2006.
20. **Алиев Т., Аббасов А., Ализаде А., Етирмишли Г., Гулуев Г., Пашаев Ф.** Интеллектуальный мониторинг аномальных сейсмических процессов на острове Песчаный Каспийского моря с использованием робастной помехотехнологии // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 5. С. 22–28.
21. **Aliev T. A., Abbasov A. M., Quluyev G. A., Pashayev F. H., Sattarova U. E.** Technologies and systems for minimization of damage from destructive earthquakes // Seismoforecasting researches carried out in the Azerbaijan territory. 2012. P. 449–464.
22. **Aliev T.** Noise Technologies for Minimization of Damage Caused by Earthquakes. Germany: Lambert Academic Publishing, 2012.
23. **Hashemi M., Alesheikh A. A.** A GIS-based earthquake damage assessment and settlement methodology // Soil dynamics and earthquake engineering. 2011. 31. P. 1607–1617.
24. **Aliev T. A., Abbasov A. M., Aliev E. R., Guluev G. A.** Digital technology and the system for receiving and analyzing the information from deep earth layers for noise—monitoring the technical state of the socially—significant objects // Automatic Control and Computer Sciences. 2007. 41. P. 59–67.
25. **Hatzigeorgiou G. D., Beskos D. E.** Soil-structure interaction effects on seismic inelastic analysis of 3-D tunnels // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2010. 30. P. 851–861.
26. **Papagiannopoulos G. A., Beskos D. E.** On a modal damping identification model for building structures // Archive of Applied Mechanics. 2006. 76. P. 443–463.
27. **Papagiannopoulos G. A., Beskos D. E.** On a modal damping identification model for non-classically damped structures subjected to earthquakes // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2009. 29. P. 583–589.
28. **Zafarani H., Noorzad A., Ansari A., Bargi K.** Stochastic modeling of Iranian earthquakes and estimation of ground motion for future earthquakes in Greater Tehran // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2009. 29. P. 722–741.
29. **Sokolov V. Y., Loh C. H., Wen K. L.** Evaluation of hard rock spectral models for the Taiwan region on the basis of the 1999 Chi-Chi earthquake data // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2003. 23. P. 715–735.
30. **Stankiewicz J., Bindi D., Oth A., Parolai S.** Designing efficient earthquake early warning systems: case study of Almaty, Kazakhstan // Journal of Seismology. 2013. V. 17, Iss. 4. P. 1125–1137.
31. **Rydelek P., Pujol J.** Real-Time Seismic Warning with a Two-Station Subarray // Bulletin of the Seismological Society of America. 2004. V. 94, N. 4. P. 1546–1550.
32. **Tsuboi S., Saito M., Kikuchi M.** Real-time earthquake warning by using broadband P Waveform // Geophysical research letters. 2002. 29. P. 2187–2191.
33. **Kanamori H.** Real-time seismology and earthquake damage mitigation // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2005. 33. P. 195–214.
34. **Lockwood O. G., Kanamori H.** Wavelet analysis of the seismograms of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake and its application to tsunami early warning // Geochimistry Geophysics Geosystems, 2006. 7. P. 1–10. URL: <http://www.agu.org/journals/abs/2006/2006GC001272.shtml>
35. **Alcik H., Ozel O., Wu Y. M., Ozel N. M., Erdik M.** An alternative approach for the Istanbul earthquake early warning system // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2011. 31. P. 181–187.
36. **Wang J. P., Wu Y. M., Lin T. L., Brant L.** The uncertainties of a Pd3-PGV onsite earthquake early warning system // Soil dynamics and earthquake engineering. 2012. 36. P. 32–37.
37. **Moser P., Moaveni B.** Design and Deployment of a Continuous Monitoring System for the Dowling Hall Footbridge // Society for Experimental Mechanics. Experimental Techniques. 2013. 37. P. 15–26.
38. **Satriano C., Yih-MinWub, Aldo Zollo, Hiroo Kanamori.** Earthquake early warning: Concepts, methods and physical grounds // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2011. 31. P. 106–118.
39. **Aliev T. A., Abbasov A. M., Guluyev Q. A., Pashayev F. H., Sattarova U. E.** System of robust noise monitoring of anomalous seismic processes // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2013.
40. **Aliev T.** Digital noise monitoring of defect origin. London: Springer-Verlag, 2007.
41. **Aliev T. A.** Robust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing, New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003.

42. Aliev T. A., Guluyev G. A., Pashayev F. H., Sadygov A. B. Noise monitoring technology for objects in transition to the emergency state // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2012. 27. P. 755–762.

43. Aliev T. A., Alizade A. A., Etirmishli G. D., Guluyev G. A., Pashayev F. G., Rzaev A. G. Intelligent Seismoacoustic System for Monitoring the Beginning of Anomalous Seismic Process // *Seismic Instruments*. 2011. V. 47, N. 1. P. 1–9.

44. Aliev T. A., Abbasov A. M., Mamedova G. G., Guluyev G. A., Pashayev F. G. Technologies for Noise Monitoring of Abnormal Seismic Processes // *Seismic Instruments*. 2013. V. 49, N. 1. P. 64–80.

45. Pujol J. Earthquake location tutorial: a graphical approach and approximate epicentral locations techniques // *Seism. Res. Lett.* 75. 2004. N. 1. P. 63–74.

46. Sambridge M., Gallagher K. Earthquake hypocenter location using genetic algorithms // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1993. V. 83, N. 5. P. 1467–1491.

47. Mehdi Khashei, Mehdi Bijari. An artificial neural network (p, d, q) model for timeseries forecasting // *Expert Systems with Applications*. 2010. 37. P. 479–489.

48. Rojas R. Neural networks. Berlin: Springer–Verlag, 1996.

Intelligent Seismic-Acoustic System for Identifying the Location of the Focus of an Expected Earthquake

A. M. Pashayev¹, info@naa.baku.az, A. A. Alizada², president@science.az,
T. A. Aliev³, telmancyber@rambler.ru, A. M. Abbasov⁴, ali@elm.az,
G. A. Guluyev³, scb06@mail.ru, F. G. Pashayev³, pasha.farhad@gmail.com,
U. E. Sattarova³, ulker.rzaeva@gmail.com

¹Azerbaijan National Academy of Aviation, Az1045, Baku, Azerbaijan Republic,

²Azerbaijan National Academy of Sciences, Az1001, Baku, Azerbaijan Republic,

³Institute of Control Systems of the Azerbaijan National Academy of Sciences,
Az1141, Baku, Azerbaijan Republic,

⁴Ministry of Communications and High Technologies, Az1000, Baku, Azerbaijan Republic

Date received: 05.11.14

This paper presents a brief review of the state-of-the-art in the field of earthquake study and forecasting. We analyze the principles of the methods for determination of the coordinates of earthquake focuses by means of ground seismic stations. We demonstrate that those methods cannot be used in the system for monitoring of the beginning of the earthquake preparation process (in the network of RNM ASP stations).

As we know, the beginning of the earthquake process is accompanied by spreading of noisy seismic-acoustic signals. Theoretically, the system for monitoring of the beginning of the earthquake process is based on the technologies for seismic-acoustic signal processing — Robust Noise Monitoring (RNM). The noise characteristics determined by RNM technologies indicate the beginning of the anomalous seismic processes (ASP) and, consequently, a possibility of ASP monitoring.

Considering that the seismic-acoustic signal can be represented as the sum of the useful signal and noise ($g = X + \varepsilon$), we present the technologies for determining noise characteristics. It is demonstrated in the paper that a change in the estimate of the cross-correlation function $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ between the useful signal $X(i\Delta t)$ and the noise $\varepsilon(i\Delta t)$, noise variance D_ε and the value of noise correlation $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ determine the beginning of ASP. One RNM ASP station determines the beginning of ASP within a radius of about 500 km. Determination of the location of an expected earthquake requires a network of RNM ASP stations.

We analyze the results of the noise technology-based monitoring of the anomalous seismic processes performed from July 2010 to June 2014 by nine seismic-acoustic stations built at the head of 10 m, 200 m, 300 m and 1400–5000 m deep wells. Based on the results of the experimental data obtained in the period covering over three years, an intelligent system has been built, which allows us to identify the location of the zone of an earthquake, using the combinations of time of change in the estimate of the correlation function between the useful signal and the noise of the seismic-acoustic information received from different stations 10–20 hours before the earthquake. In the long term, the system can be used by seismologists as a tool for determination of the location of the zone of an expected earthquake.

Keywords: seismic monitoring, anomalous seismic processes, intelligent seismic-acoustic system, robust noise technology, processing of seismic-acoustic information, expert system, neural network forecasting of earthquake zones

For citation:

Pashayev A. M., Alizada A. A., Aliev T. A., Abbasov A. M., Guluyev G. A., Pashayev F. G., Sattarova U. E. Intelligent Seismic-Acoustic System for Identifying the Location of the Focus of an Expected Earthquake, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 147–158.

DOI: 10.17587/mau/16.147-158

References

1. Kanamori H., Brodsky E. E. The physics of earthquakes. *Reports on Progress in Physics*, 2004, vol. 67, pp. 1429–1496.

2. Tothong P., Cornell C. A. An Empirical Ground-Motion Attenuation Relation for Inelastic Spectral Displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, vol. 96, pp. 2146–2164.

3. Ghahari F., Jahankhah H., Ghannad M. A. Study on elastic response of structures to near-fault ground motions through record decomposition, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, vol. 30, pp. 536–546.

4. Boore D. M., Bommer J. J. Processing of strong-motion accelerograms, needs, options and consequences, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, vol. 25, pp. 93–115.

5. Galiana-Merino J. J., Parolai S., Rosa-Herranz J. Seismic wave characterization using complex trace analysis in the stationary wavelet packet domain, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 1565–1578.

6. Yee E., Stewart J. P., Schoenberg F. P. Characterization and utilization of noisy displacement signals from simple shear device using linear and kernel regression methods, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 25–32.

7. Pavlović V. D., Veličković Z. S. Measurement of the seismic waves propagation velocity in the real medium. *The scientific journal Facta Universitatis, Series, Physics, Chemistry and Technology*, 1998, vol. 1, pp. 63–73.

8. Wang Y., Lu J., Shi Y., Yang C. PS-wave Q estimation based on the P-wave Q values, *Journal of Geophysics and Engineering*, 2009, vol. 39, pp. 386–389.

9. Mallat S. G. A Theory of Multiresolution Signal Decomposition, The Wavelet Representation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, July 1989, vol. 11, iss. 7, pp. 674–693.
10. Vidakovic B., Lozoya C. B. On time-dependent wavelet denoising, *IEEE Transaction on Signal Processing*, 1998, vol. 46, no. 9, pp. 2549–2554.
11. Colak O. H., Destici T. C., Ozen S., Arman H., Cerezci O. Frequency-energy characteristics of local earthquakes using discrete wavelet transform (DWT), *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2006, vol. 20, 38–41.
12. Hutton D. V. Fundamentals of finite element analysis, New York, McGraw-Hill, 2004, pp. 494.
13. Kislov K. V., Gravirov V. V. Earthquake Arrival Identification in a Record with Technogenic Noise, *Seismic Instruments*, 2011, vol. 47, no. 1, pp. 66–79.
14. Descherevsky A. V., Lukk A. A., Sidorin A. Y., Vstovsky G. V., Timashev S. F. Flicker-noise spectroscopy in earthquake prediction research, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, vol. 3, pp. 159–164.
15. Kossobokov V. G. Testing earthquake prediction methods: the West Pacific short-term forecast of earthquakes with magnitude $M_{wHRV} \geq 5.8$, *Tectonophysics*, 2006, vol. 413, pp. 25–31.
16. Shebalin P., Keilis-Borok V., Gabrielov A., Zaliapin I., Turcotte D. Short-term earthquake prediction by reverse analysis of lithosphere dynamics, *Tectonophysics*, 2006, vol. 413, pp. 63–75.
17. Larionov I. A., Sherbina A. O., Mishenko M. A. *Bulleting of KRAESC. Earth Sciences*, 2005, vol. 6, pp. 108–115.
18. Aliev T. A., Alizada T. A., Abbasov A. A. Method for monitoring the beginning of anomalous seismic process, *International Application No PCT/AZ2005/000006, Pub. No WO2006/130933, International Filling Date — December 19, 2005*.
19. Aliev T. A., Abbasov A. A., Aliev E. R., Guluev G. A. Method for monitoring and forecasting earthquakes, *International Application No PCT/AZ2006/000000, Pub. No WO2007/143799, International Filling Date — June 16, 2006*.
20. Aliev T., Abbasov A., Alizade A., Etirmishli G., Guluev G., Pashaev F. Intellectual Monitoring of Abnormal Seismic Process at the Gum Island of Caspian Sea with Use Robast Strays'es Technology, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2011, no. 5, pp. 22–28. (in Russian)
21. Aliev T. A., Abbasov A. M., Quluyev G. A., Pashayev F. H., Sattarova U. E. Technologies and systems for minimization of damage from destructive earthquakes, *Seismoforecasting Researches Carried out in the Azerbaijan Territory*, 2012, pp. 449–464.
22. Aliev T. Noise Technologies for Minimization of Damage Caused by Earthquakes, Germany: Lambert Academic Publishing, 2012, 220 p.
23. Hashemi M., Alesheikh A. A. A GIS-based earthquake damage assessment and settlement methodology, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 1607–1617.
24. Aliev T. A., Abbasov A. M., Aliev E. R., Guluev G. A. Digital technology and the system for receiving and analyzing the information from deep earth layers for noise-monitoring the technical state of the socially-significant objects, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2007, vol. 41, pp. 59–67.
25. Hatzigeorgiou G. D., Beskos D. E. Soil-structure interaction effects on seismic inelastic analysis of 3-D tunnels, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2010, vol. 30, pp. 851–861.
26. Papagiannopoulos G. A., Beskos D. E. On a modal damping identification model for building structures, *Archive of Applied Mechanics*, 2006, vol. 76, pp. 443–463.
27. Papagiannopoulos G. A., Beskos D. E. On a modal damping identification model for non-classically damped structures subjected to earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, vol. 29, pp. 583–589.
28. Zafarani H., Noorzad A., Ansari A., Bargi K. Stochastic modeling of Iranian earthquakes and estimation of ground motion for future earthquakes in Greater Tehran, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, vol. 29, pp. 722–741.
29. Sokolov V. Y., Loh C. H., Wen K. L. Evaluation of hard rock spectral models for the Taiwan region on the basis of the 1999 Chi-Chi earthquake data, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2003, vol. 23, pp. 715–735.
30. Stankiewicz J., Bindi D., Oth A., Parolai S. Designing efficient earthquake early warning systems: case study of Almaty, Kazakhstan, *Journal of Seismology*, October 2013, vol. 17, iss. 4, pp. 1125–1137.
31. Rydelek P., Pujol J. Real-Time Seismic Warning with a Two-Station Subarray, *Bulletin of the Seismological Society of America*, August 2004, vol. 94, no. 4, pp. 1546–1550.
32. Tsuboi S., Saito M., Kikuchi M. Real-time earthquake warning by using broadband P Waveform, *Geophysical Research Letters*, 2002, vol. 29, 2187–2191.
33. Kanamori H. Real-time seismology and earthquake damage mitigation, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2005, vol. 33, pp. 195–214.
34. Lockwood O. G., Kanamori H. Wavelet analysis of the seismograms of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake and its application to tsunami early warning, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2006, vol. 7, 1–10, available at <http://www.agu.org/journals/abs/2006/2006GC001272.shtml>
35. Alcik H., Ozel O., Wu Y. M., Ozel N. M., Erdik M. An alternative approach for the Istanbul earthquake early warning system, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 181–187.
36. Wang J. P., Wu Y. M., Lin T. L., Brant L. The uncertainties of a Pd3-PG V onsite earthquake early warning system, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 2012, vol. 36, pp. 32–37.
37. Moser P., Moaveni B. Design and Deployment of a Continuous Monitoring System for the Dowling Hall Footbridge, *Experimental Techniques, Society for Experimental Mechanics*, 2013, vol. 37, pp. 15–26.
38. Satriano C., Yih-MinWub, Aldo Zollo, Hiroo Kanamori. Earthquake early warning: Concepts, methods and physical grounds, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 106–118.
39. Aliev T. A., Abbasov A. M., Guluyev Q. A., Pashaev F. H., Sattarova U. E. System of robust noise monitoring of anomalous seismic processes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, vol. 31, 33, pp. 11–15.
40. Aliev T. Digital noise monitoring of defect origin, Springer-Verlag, London, 2007, 223 p.
41. Aliev T. A. Robust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing, Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York, 2003, 199 p.
42. Aliev T. A., Guluyev G. A., Pashayev F. H., Sadygov A. B. Noise monitoring technology for objects in transition to the emergency state, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, vol. 31, 27, pp. 755–762.
43. Aliev T. A., Alizade A. A., Etirmishli G. D., Guluev G. A., Pashaev F. G., Rzaev A. G. Intelligent Seismoacoustic System for Monitoring the Beginning of Anomalous Seismic Process, *Seismic Instruments*, 2011, vol. 47, no. 1, pp. 1–9.
44. Aliev T. A., Abbasov A. M., Mamedova G. G., Guluev G. A., Pashaev F. G. Technologies for Noise Monitoring of Abnormal Seismic Processes, *Seismic Instruments*, 2013, vol. 49, no. 1, pp. 64–80.
45. Pujol J. Earthquake location tutorial: a graphical approach and approximate epicentral locations techniques, *Seism. Res. Lett.* 2004, 75, no. 1, pp. 63–74.
46. Sambridge M., Gallagher K. Earthquake hypocenter location using genetic algorithms, *Bulletin of the Seismological Society of America*, October 1993, vol. 83, no. 5, pp. 1467–1491.
47. Mehdi Khashei, Mehdi Bijari. An artificial neural network (p, d, q) model for timeseries forecasting, *Expert Systems with Applications*, 2010, vol. 31, 37, pp. 479–489.
48. Rojas R. Neural networks, Berlin, Springer-Verlag, 1996, pp. 479.

Corresponding author:

Pashayev Farhat G., PhD, Leading Researcher, Institute of Control Systems of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Az1141, Baku, Azerbaijan Republic, e-mail: pasha.farhad@gmail.com

УДК 681.5

В. Ю. Рутковский, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., rutkov@ipu.ru,

В. М. Суханов, д-р техн. наук, зав. лаб., suhv@ipu.ru,

В. М. Глумов, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., vglum@ipu.ru,

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва

К задаче управления маломерным свободнолетающим космическим роботом

Рассматривается возможность использования принципа обратной связи в решении задачи управления свободнолетающим космическим роботом в режиме манипуляционного функционирования. В рамках данного подхода вводится математическая модель космического манипуляционного робота (КМР), содержащая в явном виде координаты отклонения схвата от цели в инерциальном пространстве. Предлагается алгоритм вычисления оценок указанных координат при наличии информации о направлении на цель и расстоянии до нее, получаемой с помощью размещенной на корпусе КМР видеокамеры со встроенным дальномером. Решается задача формирования алгоритма управления манипуляционным захватом цели в инерциальном пространстве. Приводится пример компьютерного моделирования динамики космического робота, подтверждающий работоспособность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: свободнолетающий космический манипуляционный робот, уравнения движения, алгоритм управления, манипуляционный захват цели, инерциальное пространство

Введение

Рассматриваемые в работе свободнолетающие космические манипуляционные роботы (КМР) относятся к новому классу маломерных объектов космической техники, предназначенных для выполнения различных работ в открытом космосе, в том числе для сборки больших космических конструкций различного назначения, для технического обслуживания внешних устройств пилотируемых орбитальных станций, для удаления с орбит космического мусора и т. д. [1–3]. Очевидная важность этих приложений привлекла внимание ученых к решению целого ряда проблем, связанных с разработкой теории и методов управления свободнолетающими космическими роботами. Наиболее серьезные проблемы управления КМР возникают при решении задач манипуляционного захвата цели и установки полезного груза в заданную точку инерциального (внешнего) пространства. Особые сложности, не встречающиеся в практике использования наземной робототехники, возникают при управлении манипулятором в режиме свободного дрейфа КМР, т. е. при отключенной в целях экономии расхода рабочего тела системе управления положением корпуса робота. Динамика и кинематика КМР в таком режиме существенно усложняется из-за возмущающего влияния движений манипулятора на положение корпуса, что, в свою очередь, отрицательно сказывается на поведении рабочего инструмента (схвата) при решении задачи достижения цели. Весьма сложной по сравнению с рассмотрением манипуляторов на неподвижном основании в этом

случае оказывается и задача определения рабочего пространства [4].

В большинстве публикаций, рассмотренных в обзорной работе [2], задача управления манипулятором свободно дрейфующего КМР решается на основе концепции планирования траектории схвата в инерциальном пространстве с использованием предложенной в работе [4] обобщенной матрицы Якоби для расчета вектора шарнирных скоростей манипулятора космического робота. Указанный подход к управлению КМР в режиме свободного дрейфа может быть реализован только при отсутствии внешних сил и моментов [1].

В работе [5] был предложен альтернативный (без использования процедуры планирования) подход к управлению КМР в классе систем с обратной связью на основе сигналов об отклонении схвата от цели, получаемых с помощью видеокамеры, размещенной на концевом звене манипулятора. Недостатком такого способа размещения камеры является мешающее влияние собственных движений манипулятора, решающего основную задачу управления, на процессы слежения за целью.

В данной работе рассматривается ряд вопросов, связанных с управлением КМР в классе систем с обратной связью по сигналам отклонения схвата от цели, получаемым с помощью видеокамеры (со встроенным дальномером), размещенной в шарнирном подвесе на корпусе робота. В частности решаются:

- задача формирования математической модели КМР, содержащей в явном виде подлежащие ре-

гулированию координаты отклонения схвата от цели;

- задача построения процедуры вычисления оценок указанных регулируемых координат;
- задача синтеза алгоритма управления КМР в режиме манипуляционного захвата цели.

1. Системы координат и уравнения движения

Для простоты изложения рассматривается модель плоского движения свободнолетающего КМР, состоящего из несущего тела (корпуса), снабженного собственной системой управления поступательным и угловым движениями, и трехзвенного манипулятора с вращающимися степенями свободы (рис. 1).

Предполагается, что источником информации о местонахождении цели и расстоянии до нее является система технического зрения (СТЗ), состоящая из шарнирно связанной с корпусом видеокамеры со встроенным в нее лазерным дальномером.

Для описания движения КМР введем следующие системы координат (СК): Σ_I — инерциальная СК CXY , условно называемая инерциальным (внешним по отношению к КМР) пространством; Σ_o — связанная с корпусом КМР СК oxy с началом в центре масс корпуса; СК манипулятора $o_Mx_My_M$ с началом в корневой точке манипулятора; СК подвеса видеокамеры СТЗ $o_vx_vy_v$. Оси последних двух СК параллельны соответствующим осям связанной СК Σ_o .

Обозначим: $q = (q^o, q^\alpha)^T$ — вектор обобщенных координат КМР, где $q^o = (q_1, q_2, q_3)^T \doteq (X_o, Y_o, \vartheta)^T$ — подвектор координат, задающих положение несущего тела в инерциальной СК Σ_I ; $q^\alpha = (q_4, q_5, q_6)^T \doteq (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)^T$ — подвектор координат (межзвенные углы), определяющих конфигурацию манипулятора в связанной с корпусом СК oxy (Σ_o).

Кроме того, на рис. 1 обозначено: $I\rho_o = (X_o, Y_o)$ — радиус-вектор центра масс корпуса КМР, определенный в СК Σ_I ; $I\rho_c = (X_c, Y_c)$, $o\rho_c = (x_c, y_c)$ — радиус-векторы центра масс КМР (точки c), опреде-

ленные в Σ_I и Σ_o соответственно; ρ_A — вектор визирирования цели, ρ_{sA} — вектор отклонения схвата от цели; X_s, Y_s — координаты концевой точки "s" манипулятора (схвата), определенные в СК Σ_I . Положительным направлением вращения i -го звена считаем его угловое отклонение против часовой стрелки по отношению к продольной оси $(i-1)$ -го звена; X_A, Y_A — координаты точки цели A в Σ_I ; ϑ — угловое положение корпуса в Σ_I ; φ — угол наклона оптической оси видеокамеры в СК $o_vx_vy_v$.

Полученная в работе [6] на основе уравнений Лагранжа второго рода математическая модель плоского движения КМР в векторно-матричной форме имеет вид

$$\begin{bmatrix} A_0(q) & A_{0\alpha}(q) \\ A_{0\alpha}^T(q) & A_\alpha(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}^o \\ \ddot{q}^\alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_0(q, \dot{q}) \\ B_\alpha(q, \dot{q}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M^0 + M^f \\ M^\alpha \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $A_0, A_\alpha, A_{0\alpha}$ — матрицы переменных коэффициентов $a_{ij}(q)$, $(i, j = \overline{1, 6})$, зависящих от масс и моментов инерции корпуса и звеньев манипулятора с изменяющейся во времени конфигурацией; B_0, B_α — нелинейные вектор-функции, компоненты которых содержат произведения пар обобщенных скоростей с коэффициентами b_{ij}^k , $k = \overline{1, 6}$, также зависящими от текущего распределения масс КМР. Коэффициенты $a_{ij}(q)$ и $b_{ij}^k(q)$ определены в работе [6]. M^0, M^f — векторы управляющих и возмущающих сил и моментов, приложенных к корпусу КМР; M^α — вектор шарнирных моментов манипулятора.

Учитывая, что регулируемые координатами при манипуляционном захвате цели являются отклонения $X_\Delta = X_s(t) - X_A$ и $Y_\Delta = Y_s(t) - Y_A$ координат схвата (концевой точки манипулятора s) от координат цели и скорости их изменения $\dot{X}_\Delta = \dot{X}_s(t)$, $\dot{Y}_\Delta = \dot{Y}_s(t)$, перейдем от модели (1) к новой модели движения КМР относительно переменных X_Δ, Y_Δ . Для этого в модели (1) надо перейти от вектора $q^o = (X_o, Y_o, \vartheta)^T$ к вектору $q^\Delta = (X_\Delta, Y_\Delta, \vartheta)^T$.

Для перехода от q^o к q^Δ необходимо получить соотношения, связывающие координаты X_o с X_Δ и Y_o с Y_Δ . Перенесем начало инерциальной системы координат CXY из точки C в точку A , соответствующую заданному положению неподвижной цели, т. е. в режиме манипуляционного сближения будем предполагать перевод концевой точки груза в начало координат новой инерциальной системы AXY . С учетом этого получим $X_\Delta = -X_s$, $Y_\Delta = -Y_s$, где координаты концевой точки s в новой инерциальной СК записываются в виде

$$X_s = X_o + x_s C\vartheta - y_s S\vartheta, \quad Y_s = Y_o + x_s S\vartheta + y_s C\vartheta. \quad (2)$$

Отсюда

$$X_o = -x_s C\vartheta + y_s S\vartheta - X_\Delta, \quad Y_o = -x_s S\vartheta - y_s C\vartheta - Y_\Delta. \quad (3)$$

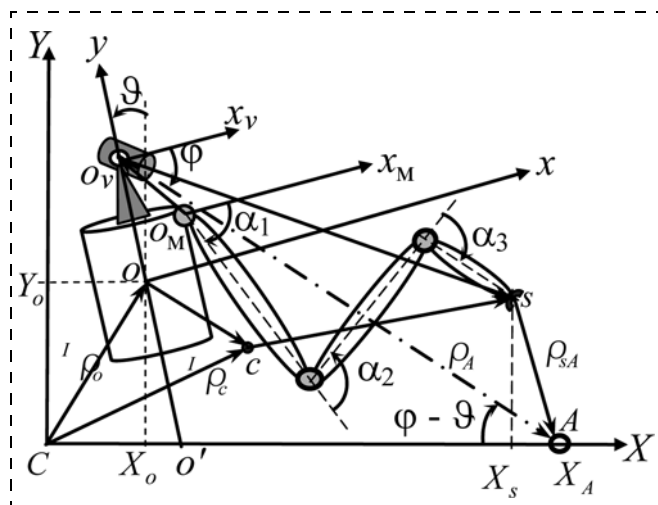


Рис. 1. Текущая конфигурация КМР в режиме захвата цели

$$x_S = x_M + \sum_{i=1}^3 l_i C \alpha_{1-i}, \quad y_S = y_M + \sum_{i=1}^3 l_i S \alpha_{1-i}. \quad (4)$$
$$\alpha_{k-n} = \sum_{i=k}^n \alpha_i, \quad k < n,$$

Подставляя (4) в (3), имеем

$$\begin{aligned}
X_o &= -X_\Delta - \left(x_M + \sum_{i=1}^3 l_i C \alpha_{1-i} \right) C\mathfrak{g} + \\
&+ \left(y_M + \sum_{i=1}^3 l_i S \alpha_{1-i} \right) S\mathfrak{g}; \\
Y_o &= -Y_\Delta - \left(x_M + \sum_{i=1}^3 l_i C \alpha_{1-i} \right) S\mathfrak{g} - \\
&- \left(y_M + \sum_{i=1}^3 l_i S \alpha_{1-i} \right) C\mathfrak{g}.
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \ddot{X}_o = & -\ddot{X}_\Delta + \sum_{i=1}^3 \left\{ \ddot{\alpha}_i \left[\sum_{j=1}^3 l_j S(\vartheta + \alpha_1 - j) \right] \right\} + \\ & + \ddot{\vartheta} \left[x_M S\vartheta + y_M C\vartheta + \sum_{i=1}^3 l_i S(\vartheta + \alpha_1 - i) \right] + \\ & + \dot{\vartheta}^2 \left[x_M C\vartheta - y_M S\vartheta + \sum_{i=1}^3 l_i C(\vartheta + \alpha_1 - i) \right] + \\ & + 2\dot{\vartheta} \sum_{i=1}^3 l_i \dot{\alpha}_{1-i} C(\vartheta + \alpha_1 - i) + \\ & + \sum_{i=1}^3 l_i [(\dot{\alpha}_{1-i})^2 C(\vartheta + \alpha_1 - i)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{Y}_o = & -\ddot{Y}_\Delta - \sum_{i=1}^3 \left\{ \ddot{\alpha}_i \left[\sum_{j=1}^3 l_j C(\vartheta + \alpha_1 - j) \right] \right\} - \\ & - \ddot{\vartheta} \left[x_M C\vartheta - y_M S\vartheta + \sum_{i=1}^3 l_i C(\vartheta + \alpha_1 - i) \right] + \\ & + \dot{\vartheta}^2 \left[x_M S\vartheta + y_M C\vartheta + \sum_{i=1}^3 l_i C(\vartheta + \alpha_1 - i) \right] + \\ & + 2\dot{\vartheta} \sum_{i=1}^3 l_i \dot{\alpha}_{1-i} S(\vartheta + \alpha_1 - i) + \\ & + \sum_{i=1}^3 l_i [(\dot{\alpha}_{1-i})^2 S(\vartheta + \alpha_1 - i)]. \end{aligned}$$

ваний получим модифицированную модель движения КМР, содержащую в явном виде вторые производные регулируемых координат X_{Δ} и Y_{Δ} . Полученная модель в векторно-матричной форме может быть записана в виде

$$\begin{bmatrix} \tilde{A}_0(\tilde{q}) & \tilde{A}_{0\alpha}(\tilde{q}) \\ \tilde{A}_{0\alpha}^\top(\tilde{q}) & \tilde{A}_\alpha(\tilde{q}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\tilde{q}}^\Delta \\ \ddot{\tilde{q}}^\alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{B}_0(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}) \\ \tilde{B}_\alpha(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M^0 + M^f \\ M^\alpha \end{bmatrix}. \quad (7)$$

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_0 & \tilde{A}_{0\alpha} \\ \tilde{A}_{0\alpha}^T & \tilde{A}_\alpha \end{bmatrix} \text{ новой модели (7) и векторов}$$

2. Определение оценок координат нения схвата от цели по измерениям СТЗ, установленной на корпусе КМР

Углы φ , ϑ и расстояние $|\rho_A| = \overline{o_v A}$ до цели измеряются.

$$\varphi + \phi - \gamma = \frac{\pi}{2}, \quad (8)$$

161

Из подобия треугольников $\Delta o_v ob \sim \Delta x_s b$ следует

$$\frac{|y_s|}{|y_{ov}|} = \frac{\overline{x_s b}}{|x_s| - \overline{x_s b}} = \frac{\overline{ab}}{\overline{o_v b}}, \quad (9)$$

где $\overline{x_s b}$, $\overline{s b}$, $\overline{o_v b}$ — принятые обозначения сторон треугольников (как отрезков прямых), $y_{ov} \equiv \overline{o o_v}$, x_s , y_s — координаты схвата в связанной СК Σ_o , $x_s = x_{o_1} + \sum_{j=1}^3 \left[l_j \cos \left(\sum_{i=1}^j \alpha_i \right) \right]$, $y_s = y_{o_1} + \sum_{j=1}^3 \left[l_j \sin \left(\sum_{i=1}^j \alpha_i \right) \right]$, l_j , ($j = 1, 2, 3$) — длины звеньев манипулятора; $\alpha_i = \alpha_i(t)$, $i = 1, 2, 3$, — межзвенные углы.

Из (9) следует

$$\overline{x_s b} = \frac{|x_s y_s|}{|y_s| + |y_{ov}|}. \quad (10)$$

Поскольку $\operatorname{tg} \phi = \frac{\overline{x_s b}}{|y_s|}$, то с учетом (10) найдем

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{|x_s|}{|y_s| + |y_{ov}|}. \quad (11)$$

Учитывая (11), получим

$$|\rho_s| = \overline{o_v s} = \frac{x_s}{\sin \phi} = \sqrt{x_s^2 + (y_s + y_{ov})^2} \quad (12)$$

и, используя (8), найдем

$$\gamma = \phi - \operatorname{arccctg} \frac{|x_s|}{|y_s| + |y_{ov}|}. \quad (13)$$

Для треугольника $\Delta o_v s A$ справедливы выражения для угла

$$\angle s A o_v = \operatorname{arctg} \left(\frac{\overline{o_v s} - \overline{o_v A}}{\overline{o_v s} + \overline{o_v A}} \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2} \right) + \frac{\pi - \gamma}{2} \quad (14)$$

и расстояния от точки "s" до цели A

$$\overline{s A} = |\rho_{sA}| = \frac{\overline{o_v s} \sin \gamma}{\sin(\angle s A o_v)}. \quad (15)$$

В соответствии с рис. 2 имеем

$$\angle s A C = \phi - \vartheta + \angle s A o_v. \quad (16)$$

Выражения (14)—(16) позволяют вычислять оценки координат отклонения точки "s" от целевой точки A:

$$\begin{aligned} \hat{X}_\Delta &= X_s - X_A = \overline{s A} \cos(\angle s A C), \\ \hat{Y}_\Delta &= Y_s - Y_A = \overline{s A} \sin(\angle s A C). \end{aligned} \quad (17)$$

3. Алгоритм случайного поиска в режиме захвата цели

В работе [8] были решены три задачи, предвещающие возможность перехода КМР в рассматриваемый ниже режим манипуляционного захвата цели в инерциальном пространстве Σ_f :

1) предложен вычислительный алгоритм оперативного построения секторного рабочего пространства КМР, зависящего от исходной конфигурации манипулятора q_0^α и текущего распределения масс системы (с учетом массы переносимого груза);

2) определено расстояние $d^* = \overline{o_v A^*}$, при котором цель A становится манипуляционно достижимой для КМР;

3) определено требуемое значение начальной ориентации КМР ϑ_0^* , при котором заранее построенное секторное рабочее пространство "накрывает" целевую точку A.

Полагая указанные задачи решенными, рассмотрим далее задачу формирования алгоритма управления КМР, динамика которого описывается уравнениями (7), при манипуляционном захвате цели с использованием оперативного вычисляемых по формулам (11)—(17) оценок координат отклонения $\hat{X}_\Delta$, $\hat{Y}_\Delta$ конечной точки "s" от целевой точки A.

Пусть КМР, снабженный шарнирно связанной с корпусом видеокамерой, ориентированной на целевую точку A (см. рис. 1), завис в окрестности цели на расстоянии $d^* = \overline{o_v A}$, измеряемом встроенным в видеокамеру дальномером. Конфигурация q_0^α , текущее распределение масс КМР с грузом известны. Требуемая начальная ориентация корпуса ϑ_0^* выполнена с помощью системы управления движением КМР (поступательным и угловым), которая в режиме захвата цели отключается, и дальнейшие движения КМР определяются только действием шарнирных моментов M_{ar} . При этом изменяются не только межзвенные углы q^α , но, как следствие, и компоненты вектора q^Δ , из которых в нашем случае X_Δ , Y_Δ являются регулируемыми координатами.

Напомним, что в отличие от известных методов управления космическими роботами, основанных на планировании траектории схвата [1—4], мы будем решать задачу манипуляционного захвата неподвижной цели в заданной точке инерциального пространства на основе принципов управления в классе систем с обратной связью.

В режиме манипуляционной установки груза в заданную точку A(X_A , Y_A) начальное состояние КМР определим в виде

$$q_0^\Delta = (X_{\Delta 0}, Y_{\Delta 0}, \vartheta_0^*), \quad q_0^\alpha = (\alpha_1^0, \alpha_2^0, \alpha_3^0), \quad \dot{q}_0 = 0.$$

При этом считается, что в начальный момент времени оптическая ось камеры ориентирована на цель. Это позволяет измерять текущее расстояние от камеры до цели с помощью встроенного в видео-

камеру дальномера. Чтобы в процессе управления цель A оставалась в поле зрения видеокамеры, должно быть регулируемым и угловое отклонение оптической оси от цели $\varphi_\Delta = (\varphi - \varphi^*)$, где φ^* — угловое положение камеры, при котором линия визирования СТЗ для заданного начального состояния вектора q_0^Δ проходит через целевую точку. Ошибка φ_Δ может быть определена (измерена) как величина снижения уровня выходного сигнала СТЗ $u_{СТЗ}(\varphi_\Delta) = f(\varphi_\Delta^{-1})$ при отклонении оси видеокамеры от направления на цель.

Пусть измеряемыми координатами в рассматриваемом режиме манипуляционного функционирования являются:

$$\vartheta, r_{sA} = |\rho_{sA}|, \varphi, \alpha_r, \dot{\alpha}_r \quad (r = 1, 2, 3).$$

Цель управления определим в виде следующих трех подзадач, в комплексе решающих задачу захвата цели A в инерциальном пространстве:

- задача непрерывности слежения за целью

$$\varphi_\Delta = (\varphi - \varphi^*) \rightarrow 0 \quad \forall t \leq t_k; \quad (18.1)$$

- задача достижимости цели

$$|X_\Delta(t_k)| \leq \varepsilon_X, |Y_\Delta(t_k)| \leq \varepsilon_Y; \quad (18.2)$$

- задача обеспечения безударного ("мягкого") захвата цели

$$\dot{X}_\Delta(t_k) \approx 0, \dot{Y}_\Delta(t_k) \approx 0, \quad (18.3)$$

где t_k — время выполнения операции, $\varepsilon_X, \varepsilon_Y = \text{const}$ — малые постоянные.

Для решения указанного комплекса задач введем раздельное управление движениями схвата, приняв, что регулирующим воздействием на координату X_Δ является шарнирный момент M_{α_1} , вызывающий изменение угла α_1 . Координата Y_Δ управляется шарнирным моментом M_{α_2} , изменяющим α_2 . Управление ориентацией схвата в задаче захвата цели считаем отсутствующим, т. е. $M_{\alpha_3} = 0$ ($\alpha_3 = \text{const}$).

Задача (18.1), связанная с организацией процесса слежения за целью шарнирно связанной с корпусом КМР видеокамеры, является вспомогательной, однако ее решение необходимо для осуществления текущих измерений расстояния $r_{sA} = |\rho_{sA}|$ до целевой точки A . Эти измерения участвуют далее в вычислении по формулам (11)—(17) оценок $\dot{X}_\Delta$ и $\dot{Y}_\Delta$, управляющих приводами плечевого (α_1) и локтевого (α_2) шарниров при решении основной задачи (18.2). Процесс слежения за целью осуществляется с помощью подсистемы управления приводом подвеса камеры на основе использования РД-алгоритма в цепи обратной связи по координате $\varphi_\Delta(t)$, моделирующей сигнал отклонения оси чувствительно-сти видеокамеры от направления на цель.

В качестве возможного пути для решения задачи (18.2), связанной с управлением поступательным движением схвата (X_Δ, Y_Δ), предлагается использовать модификацию известного алгоритма случайного поиска с возвратом [9], работоспособность которого

обеспечивается благодаря удержанию только удачных случайных шагов управления $\Delta q_{r(n)}^s < 0$, уменьшающих отклонение концевой точки s от цели. Неудачные шаги ($q_{r(n)}^s \geq 0$) исправляются за счет изменения знака воздействия на очередном шаге управления. Введенная здесь оценка $\Delta q_{r(n)}^s$, определяющая характер изменения регулируемых координат $X_{\Delta n}, Y_{\Delta n}$ на n -м шаге управления, имеет вид

$$\Delta q_{r,n}^s = |q_r^\Delta(t_2^r)|_n - |q_r^\Delta(t_1^r)|_n, \quad r = 1, 2; \quad n = 1, 2, \dots \quad (19)$$

Управление шарнирными углами осуществляется на интервалах управления T_n^r , длительность которых пропорциональна модулям значений регулируемых координат $q_1^\Delta \doteq X_\Delta, q_2^\Delta \doteq Y_\Delta$ в начале n -го интервала управления, т. е.

$$T_n^r = (t_2^r - t_1^r)_n = k_r |q_r^\Delta(t_1^r)|_n, \quad r = 1, 2. \quad (20)$$

Рекуррентная формула алгоритма по каждому из двух локальных каналов управления может быть записана в виде

$$\begin{aligned} u_{n+1}^r &= \xi_{n+1}^r \bar{u}^r \quad \forall t \in T_{n+1}^r, \\ \xi_{n+1}^r &= \begin{cases} 1 \quad \forall \Delta q_{r,n}^s < 0, \\ -1 \quad \forall \Delta q_{r,n}^s \geq 0, \end{cases} \quad (21) \\ r &= 1, 2; \quad n = 1, 2, \dots, \end{aligned}$$

где ξ_{n+1}^r — знак постоянного по уровню управляющего напряжения $\bar{u}^r$ на входе r -го привода манипулятора на $(n+1)$ -м интервале управления; оценка $\Delta q_{r,n}^s$ контролирует характер изменения регулируемой координаты на предыдущем шаге управления.

Следует заметить, что в алгоритме (21) оператор случайного шага ξ_{n+1}^r является случайным событием (в смысле выбора одного из значений $(+1, -1)$) преимущественно на первом шаге управления, совершаемом в качестве пробного движения ($n=0$). По этой причине значение первого шага выбирается относительно небольшим $T_1^r = T_{\min}^r$, соответствующая постоянному шагу $T_{\min}^r = \text{const}$, принятому для области малых отклонений от цели ε_1 , определенной в виде ($\varepsilon_2 < |q_r^s| \leq \varepsilon_1$), где ε_2 — граница области безударного захвата цели. На втором и последующих шагах T_n^r , определяемых выражением (20), знак управляющего напряжения устанавливается правилом, приведенным во второй части алгоритма (21), в соответствии с которым при правильном выборе знака $\xi_n = (+1, -1)$ на n -м шаге управления этот знак должен быть сохранен и на $(n+1)$ -м шаге. Правильность выбора знака ξ_n оценивается по результату $\Delta q_{r,n}^s < 0$.

Алгоритм управления в области ($\varepsilon_2 < |q_r^s| \leq \varepsilon_1$) условно назовем $u_{\varepsilon_1}^r$, напомним, что он не отличается от алгоритма (21) за исключением функции

определения текущего интервала управления (20), принимающего в указанной области вид

$$T_n^r = T_{\min}^r = \text{const.}$$

В целом решение задачи (18.2) может быть осуществлено путем попеременной ($r = 1 \vee 2$) или одно-временной ($r = 1 \ \& \ 2$) активации подсистем управ-

ления сближением. В обоих случаях алгоритм, определяемый выражениями (21), сохраняет работоспособность, однако для решения задачи безударной встречи (18.3) область его действия в процессе сближения с целью A должна быть ограничена моментом вхождения в малую ε_2 -окрестность, определенную в виде $(|X_\Delta|, |Y_\Delta| \leq \varepsilon_2, \varepsilon_2 < \varepsilon_1)$ и содержащую точку A . В ε_2 -окрестности исходный алгоритм (21) должен быть заменен на такой закон управления u_{ε_2} (например, ПД алгоритм [5]), который способен обеспечить монотонный характер изменения регулируемых координат X_Δ, Y_Δ при $\dot{X}_\Delta, \dot{Y}_\Delta \rightarrow 0$ в завершающей фазе сближения с целью.

4. Пример компьютерной реализации предложенного подхода к управлению КМР

На рис. 3 приведен пример компьютерной реализации в системе MATLAB-Simulink предложенного подхода к управлению КМР в режиме манипуляционной установки груза для случая попеременной работы подсистем управления плечевым (α_1) и кистевым (α_2) шарнирами. В качестве математической модели объекта были использованы уравнения (7).

Числовые значения основных параметров модели КМР, необходимые для расчета коэффициентов матриц $\tilde{A}_0, \tilde{A}_\alpha, \tilde{A}_{0\alpha}$ и нелинейных функций $\tilde{B}_0, \tilde{B}_\alpha$ (см. работы [6, 7]) в уравнениях (7), представлены в таблице; $X_{\Delta 0} = 0,31$ м, $Y_{\Delta 0} = 0,67$ м; $\vartheta_0, \dot{\vartheta}_0 = 0$. Начальная конфигурация манипулятора q_0^α определена значениями ($\alpha_1^0 = -1,5$ рад; $\alpha_2^0 = 2,8$ рад; $\alpha_3^0 = -1,5$ рад).

Из осциллограмм видно, что управляемые в соответствии с алгоритмами u_n^r, u_{ε_1} и u_{ε_2} (рис. 3, а) перемещения звеньев (α_1, α_2) (рис. 3, б) обеспечивают перевод характерной точки "а" груза из начального положения $X_\Delta(t_0) = 0,3$ м, $Y_\Delta(t_0) = 0,67$ м в малую окрестность целевой точкой A ($\varepsilon_2 \leq 0,1$ м) за время $t_{\varepsilon_2} = 200$ с (рис. 3, в). При этом ПД алгоритм

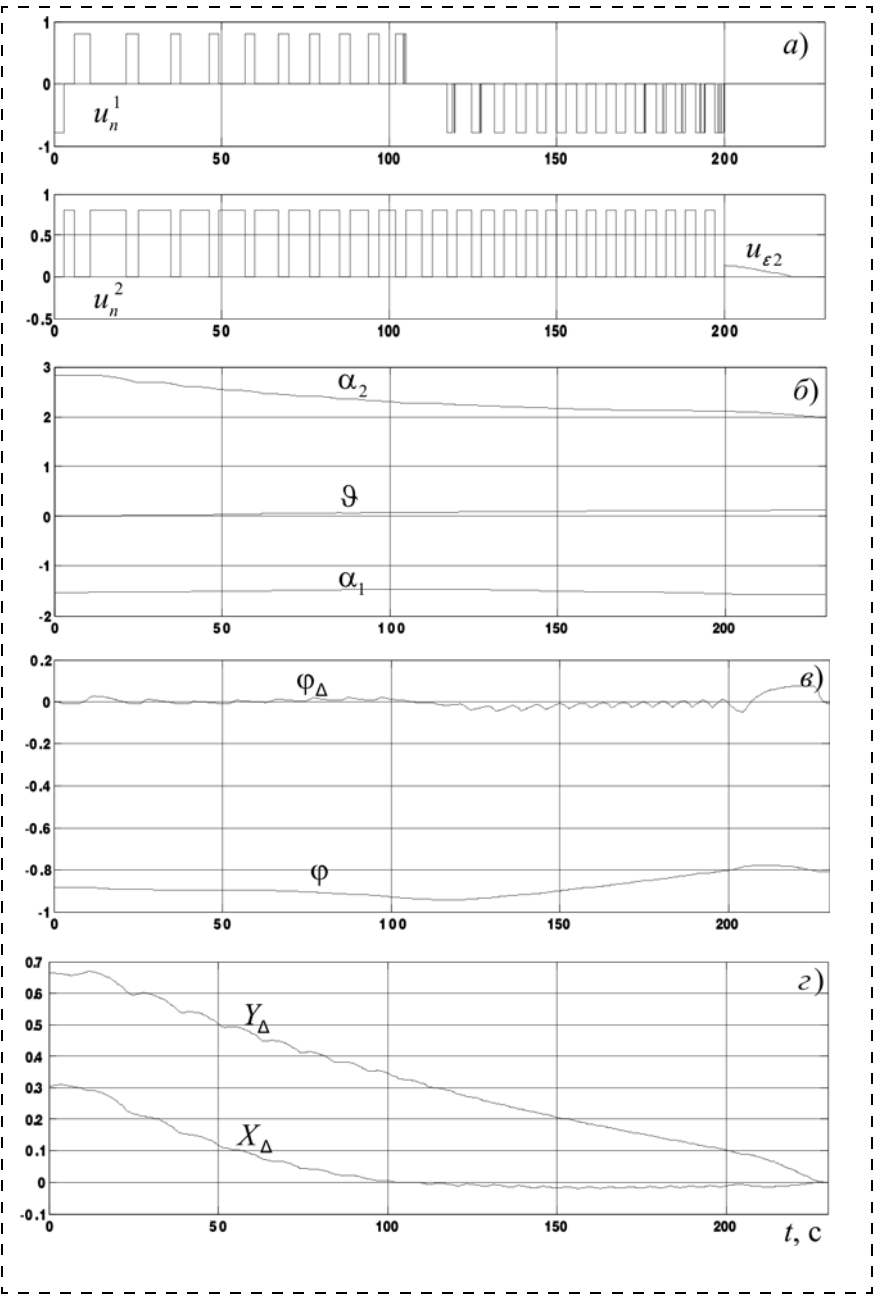


Рис. 3. Управляющие сигналы и переходные процессы в режиме манипуляционного функционирования КМР при использовании алгоритма случайного поиска

Параметры модели КМР				
m_i , кг, $i = \overline{0, 4}$	J_i , кг · м ² , $i = \overline{0, 4}$	l_i , кг, $i = \overline{0, 3}$	r_{ci} , м, $i = \overline{1, 3}$	(x_M, y_M) , м, $i = 0$
[500;15; 10; 5;10]	[90;2; 0,8; 0,1;0,0]	[1,2; 1,0; 0,4]	[0,7; 0,6; 0,2;]	[0,4; 0,6]

управления приводом подвеса камеры с достаточной точностью ($\varphi_{\Delta} \leq 0,05$) поддерживает требуемое направление оптической оси видеокамеры на целевую точку (рис. 3, в), позволяющее встроенному в нее дальномеру измерять текущее расстояние до цели и вычислять оценки регулируемых координат X_{Δ} , Y_{Δ} , используемые в алгоритмах управления (21) и u_{ε_1} .

На завершающем участке моделирования, начиная с момента $t_{\varepsilon_2} = 200$ с, реализован процесс "мягкой" стыковки груза с целью (рис. 3, а, г), осуществленный с помощью адаптивного ПД алгоритма u_{ε_2} , описанного в работе [5].

Заключение

Решена конкретная задача, связанная с разработкой нового (без использования известной процедуры планирования траектории схвата) подхода к управлению свободнолетающим космическим роботом в режиме манипуляционного функционирования в инерциальном пространстве. Представляется, что разработанная процедура вычисления оценок координат отклонения схвата манипулятора от цели должна позволить практически реализовать предложенный в работе поисковый алгоритм управления манипулятором КМР в классе систем с обратной связью, использующей сигналы размещенной на корпусе робота видеокамеры со встроенным дальномером.

Полученные в работе результаты носят достаточно локальный характер, что пока затрудняет осуществление углубленного сравнения с результатами применения традиционного подхода к проблеме управления свободнолетающими КМР на основе процедуры планирования траектории схвата.

Дальнейшее развитие предложенного в работе подхода к управлению КМР в классе систем с обратной связью заключается в постановке и решении задач формирования алгоритмов, обеспечивающих работоспособность и требуемое качество функционирования КМР при наличии внешних возмущений и плохой определенности модели объекта.

Список литературы

1. Dubowsky S., Papadopoulos E. The Kinematics, Dynamics, and Control of Free-Flying and Free-Floating Space Robotic Systems // IEEE Transact. Robot. Automat. 1993. V. 9. № 5. P. 531–543.
2. Moosavian S. Ali A., Papadopoulos E. Free-flying Robots in Space: an Overview of Dynamics Modeling, Planning and Control // J. Robotica. 2007. N. 25 (5). P. 537–547.
3. Xu W. F., Liu Yu., Liang B. et al. Autonomous Path Planning and Experiment Study of Free-floating Space Robot for Target Capturing // J. Intell. Robot. Syst. 2008. N. 51. P. 303–331.
4. Umetani Y., Yoshida K. Resolved motion rate control of space manipulators with generalized Jacobian matrix // IEEE Trans. Robot. Automat. 1989. N. 5 (3). P. 303–314.
5. Рутковский В. Ю., Суханов В. М., Глумов В. М. Некоторые вопросы управления свободнолетающим космическим манипуляционным роботом // Автоматика и Телемеханика. 2013. № 11. С. 62–83.
6. Рутковский В. Ю., Суханов В. М., Глумов В. М. Уравнения движения и управление свободнолетающим космическим манипуляционным роботом в режиме реконфигурации // Автоматика и Телемеханика. 2010. № 1. С. 80–98.
7. Силаев А. В., Суханов В. М. Математическая модель свободнолетающего космического робота в режиме манипуляционного функционирования во внешнем пространстве // Матер. конф. "Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах" (УТЭОСС—2012). СПб.: ОАО "Концерн ЦНИИ "Электроприбор", 2012. С. 806–809.
8. Суханов В. М., Рутковский В. Ю., Глумов В. М. Определение рабочей зоны и требуемого начального положения свободнолетающего космического робота при захвате цели // Автоматика и Телемеханика. 2014. № 11. С. 150–159.
9. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.

On a Small Free-Flying Space Robot Control Task

V. Yu. Rutkovsky, rutkov@ipu.ru, V. M. Sukhanov, suhv@ipu.ru, V. M. Glumov, vglum@ipu.ru,
Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 117997, Moscow, Russian Federation

Date received: 19.11.14

The authors discuss a possibility of application of the feedback principle for the task of control of a free-flying space handling robot (SHR) in the mode of handling operation. They propose a robot consisting of the main body (case), which has the control system by rotation and translational movement, and the three-links manipulator with rotation degree of freedom for each link. The SHR is expected to have a system of technical vision for obtaining information about the location of the target and the distance to it. The mathematical model of the space handling robot is introduced. For simplicity reasons the plane motion of the SHR is considered. The model has the coordinates of a grip deflection from a target in the inertial space in an explicit form. An algorithm is proposed for estimation of the coordinates with account of the information about the direction of the target and the distance to it. This information is obtained with the use of the range finder built in the video camera which is placed on the SHR case. The task of the control algorithm formation by the target capture in the inertial space is solved. The control task is determined as the solution of the three subtasks: 1) continuous target tracking, 2) accessibility of the target and 3) guarantee of soft-docking. The first subtask is an auxiliary one. But its solution is necessary for realization of measurements of the distance between the grip and the target. As a way to solve the second subtask the authors suggest a modification of the well-known random search with a return algorithm. Its efficiency is guaranteed by taking into account only the successful random steps of control which decrease the distance to the target. For soft docking (subtask 3) the area of the suggested algorithm must be restricted by the time moment when the SHR enters the small area which includes point A (target). An example of the free-flying space robot dynamics computer simulation is presented, which proves the efficiency of the proposed algorithm.

Keywords: free-flying space handling robot, equation of motion control algorithm, manipulation takeover target, inertial space

For citation:

Rutkovsky V. Yu., Sukhanov V. M., Glumov V. M. On a Small Free-Flying Space Robot Control Task, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 159–166.

DOI: 10.17587/mau.16.159-166

References

1. **Dubowsky S., Papadopoulos E.** The Kinematics, Dynamics, and Control of Free-Flying and Free-Floating Space Robotic Systems, *IEEE Transact. Robot. Automat.*, 1993, vol. 9, no. 5, pp. 531–543.
2. **Moosavian S. Ali A., Papadopoulos E.** Free-flying Robots in Space: an Overview of Dynamics Modeling, Planning and Control, *J. Robotica*, 2007, no. 25 (5), pp. 537–547.
3. **Xu W. F., Liu Yu., Liang B., Yangsheng Xu, Wenyi Qiang.** Autonomous Path Planning and Experiment Study of Free-floating Space Robot for Target Capturing, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2008, no. 51, p. 303–331.
4. **Umetani Y., Yoshida K.** Resolved motion rate control of space manipulators with generalized Jacobian matrix, *IEEE Trans. Robot. Automat.*, 1989, no. 5 (3), pp. 303–314.
5. **Rutkovsky V. Yu., Sukhanov V. M., Glumov V. M.** Nekotorye voprosy upravleniya svobodnoletajushhim kosmicheskim manipulya-

cionnym robotom, *Avtomatika i Telemekhanika*, 2013, no. 11, pp. 62–83 (in Russian).

6. **Rutkovsky V. Yu., Sukhanov V. M., Glumov V. M.** Uravneniya dvizheniya i upravlenie svobodnoletajushhim kosmicheskim manipulyacionnym robotom v rezhime rekonfiguracii, *Avtomatika i Telemekhanika*, 2010, no. 1, pp. 80–98 (in Russian).

7. **Silaev A. V., Sukhanov V. M.** Matematicheskaja model' svobodnoletajushhego kosmicheskogo robota v rezhime manipulyacionnogo funkcionirovanija vo vnesnem prostranstve, *Materialy konferencii "Upravlenie v tehniceskix, jergaticeskix, organizacionnyh i setevyx sistemah" (UTJeOSS-2012)*, Saint Peterburg, OAO "Koncern CNII "Jelektroprigor", 2012, pp. 806–809 (in Russian).

8. **Sukhanov V. M., Rutkovsky V. Yu., Glumov V. M.** Opreделение rabochej zony i trebuemogo nachal'nogo položenija svobodnoletajushhego kosmicheskogo robota pri zahvate celi, *Avtomatika i Telemekhanika*, 2014, no. 11, pp. 150–159 (in Russian).

9. **Krasovskiy A. A.** *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravlenija* (Handbook of automatic control theory), Moscow, Nauka, 1987, 712 p. (in Russian).

Corresponding author:

Sukhanov Victor M., Leading Resercher, Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 117997, Moscow, Russian, suhv@ipu.ru

УДК 621.86

В. Г. Градецкий¹, гл. науч. сотр., д-р тех. наук, проф., gradet@ipmnet.ru,

М. М. Князьков¹, ст. науч. сотр., канд. тех. наук, **Е. А. Семёнов**¹, ст. науч. сотр., канд. тех. наук,

А. Н. Суханов^{1, 2}, инженер, аспирант, sukhano-artiom@yandex.ru

¹ Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва,

² Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", Москва

Движение мобильного робота по горизонтальным, наклонным и вертикальным поверхностям при наличии возмущений и подвижных препятствий¹

Выполнен анализ управляемого движения мобильного робота по поверхностям, расположенным под различными углами к горизонту в неструктурированных условиях окружающей среды, в случае возмущающих воздействий, вызванных особенностями поверхностей передвижения. Анализируются различные ситуации взаимного расположения робота и подвижных препятствий, двигающихся с определяемыми сенсорной системой робота относительными скоростями, в которых обеспечивается обход препятствий посредством выбранной стратегии.

Предложены алгоритмы управления, обеспечивающие объезд подвижных препятствий.

Ключевые слова: мобильный робот, горизонтальная, наклонная, вертикальная поверхности, внешние возмущения, неструктурированная среда, алгоритм, стратегия управления

Введение

Исследования в области динамики и управляемых движений мобильных роботов, способных перемещаться не только по горизонтальным поверхностям, но и по поверхностям, расположенным под различными углами к горизонту, в том числе под углами 90°, ведутся в известных лабораториях многих стран [1–17]. Исследования в основном были направлены на обеспечение выполнения технологических процессов при инспекции, неразрушающем контроле, очистке, покраске протяженных поверхностей таких объектов, как корпуса кораблей [3, 5], энергетические установки на атомных

электростанциях [6–8], резервуары [10–13]. Выполнение таких технологических операций не требовало больших скоростей движения мобильных роботов и ограничивалось скоростями 0,3...3 м/мин при перемещении в детерминированных средах. Возникшие новые задачи использования мобильных роботов в экстремальных неструктурированных условиях, связанных с пожаротушением, мониторингом окружающей среды, разведкой местности, потребовали разработки новых подходов к исследованию динамики и созданию систем управления, связанных с увеличением скоростей движения в заранее неизвестной обстановке.

Рассматривается движение мобильных роботов в таких неструктурированных условиях, которые характеризуются наличием внешних возмущений

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, Грант № 14-11-00298.

и подвижных препятствий. Предполагается, что внешние возмущения связаны с изменениями материалов или качества поверхностей, по которым осуществляется движение, а препятствия перемещаются с ограниченными скоростями. Несмотря на то, что ранее были выполнены исследования по обходу препятствий [18–21], особенности движения рассматриваемого класса роботов не учтены.

Архитектура системы управления и алгоритмы реализации движения мобильного робота по горизонтально расположенным поверхностям при обходе препятствий приведены в работе [18], где формулируются условия преодоления препятствий в рискованных и трудных условиях окружающей среды.

Алгоритмы обхода препятствий в динамически изменяющихся внешних условиях на основе потенциальных полей предложены в работе [19], среди которых имеется адаптивный алгоритм для планирования движения с обходом препятствий.

В работе [20] рассмотрено движение двухколесного робота по горизонтальной поверхности в подвижной внешней среде, приводятся модели движения с учетом проскальзывания колес с реализацией на основе логико-лингвистического нечеткого алгоритма и нечеткого логического регулятора. Система слежения за программной траекторией позволяет осуществлять движение в заданное конечное положение в условиях проскальзывания колес и обхода препятствий применительно к задачам в частных случаях.

Общие сведения и основные понятия о нечетких нейросистемах даются в ряде работ, например, в работах [21, 25], в которых не отражены особенности использования методов нечеткой логики для исследования движения мобильных роботов.

Считается перспективным способ реализации системы управления, основанный на создании нейросетевых моделей, для которых рассчитываются математические модели нечеткой логики, учитывающие такие факторы, как многомерность, нелинейность, нестационарность, структурно-параметрическая неопределенность. Для построения таких систем реализуется иерархическое управление. В зависимости от типа робототехнической системы и сложности задач, для решения которых она предназначена, иерархическая система управления может иметь различное число уровней. Обычно выделяются четыре уровня управления:

- *высший*, на котором происходит распознавание препятствий в рабочем пространстве и принимается решение о порядке выполнения поставленной задачи;
- *стратегический*, на котором поставленная задача расчленяется на элементарные операции;
- *тактический*, когда элементарные операции распределяются на движения отдельных степеней свободы;
- *исполнительный*, на котором осуществляются заданные движения отдельных степеней свободы [22–24].

Планирование траектории движения робототехнических систем может осуществляться интеллектуальной вычислительной системой или человеком-оператором, использующим различные задающие устройства [25]. К недостаткам таких систем можно отнести сложность построения адекватных математических моделей и дополнительное требование к вычислительным ресурсам системы управления.

Используются программные алгоритмы построения пути из одной точки пространства в другую с использованием сенсорных ультразвуковых систем, видеосистем распознавания изображения и лазерных дальнометров.

В представленной работе учитываются специфические особенности движения роботов, способных перемещаться по поверхностям, расположенным под различными углами к горизонту. Особенности движения таких роботов определяются дополнительными требованиями к условиям передвижения и ограничениями, накладываемыми на параметры движения препятствий.

1. Некоторые конструктивные особенности роботов вертикального перемещения при движении в динамически изменяемых средах

Рассмотрим требования, предъявляемые к конструкциям роботов вертикального перемещения (РВП) для движения в динамически изменяемых средах.

Существуют два основных типа РВП, использующих вакуумный принцип перемещения:

1. РВП шагающие.
2. РВП непрерывного движения со скользящим уплотнением.

Особенностью РВП первого типа, в частности мультиплатформенных систем, является тот факт, что перемещение происходит на определенную длину шага в зависимости от хода движителя. Например, это ход штока пневматического цилиндра. При движении в динамически изменяемых средах конструкция РВП должна содержать необходимое число датчиков, информация от которых должна поступать в систему управления робота.

При движении вперед конструкция РВП должна содержать минимум два датчика, передающих информацию о положении, размерах и движении возможного препятствия перед роботом.

Таким образом, датчики должны быть расположены так, как показано на рис. 1.

Зона охвата датчика D_1 должна быть не менее, чем габаритная ширина РВП плюс габаритная ширина РВП, умноженная на 0,1 с каждой стороны робота.

Зона охвата датчика D_2 должна быть не менее, чем длина шага робота плюс шаг РВП, умноженный на 0,2. При этом опрос датчиков должен проводиться в начале, во время и в конце цикла движения. В зависимости от информации, поступающей от датчиков, система управления должна принять решение об остановке, преодолении или обходе препятствия РВП.

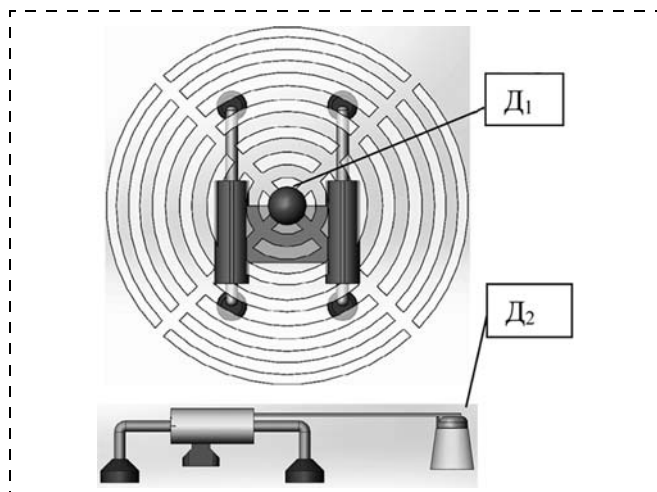


Рис. 1. Схема конструкции РВП с поворотным узлом и сенсорной бортовой системой

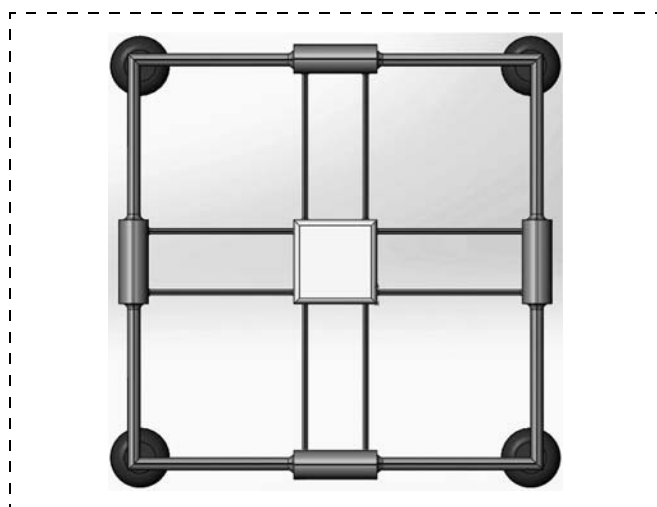


Рис. 2. Схема конструкции РВП без поворотного узла

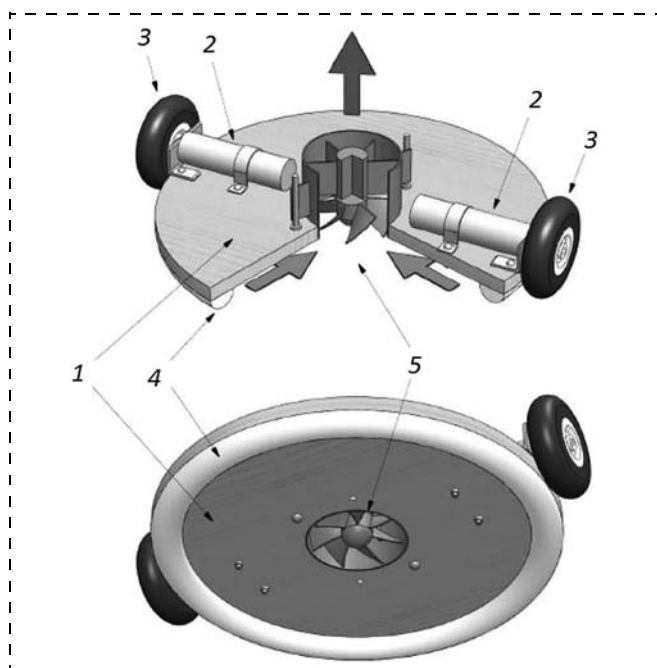


Рис. 3. Схема конструкции РВП со скользящим уплотнением

При движении влево и вправо все требования к конструкции РВП и его датчиков аналогичны.

Исходя из анализа существующих конструкций шагающих РВП для ускорения обхода препятствий предлагается ввести дополнительные приводы, перемещающие робот влево или вправо (рис. 2).

Пневматические приводы линейного движения применяются в зависимости от поставленной задачи.

При этом не используется узел поворота при получении информации с датчиков о размерах и направлении движения препятствия, а робот принимает решение перешагнуть препятствие или его обойти, включая приводы движения влево/вправо.

Вследствие этого увеличивается быстродействие РВП, так как робот сразу начинает движение в нужном направлении, не используя узел поворота.

Особенностями конструкции робота со скользящим уплотнением (рис. 3) является его непрерывное движение. Такой робот не может переходить через препятствия, а только может обходить их, поэтому отпадает необходимость в датчиках, передающих информацию о ширине или глубине препятствия. В данном случае целесообразно установить датчики, обнаруживающие препятствие спереди, слева и справа от РВП. При этом существенно повышаются требования к их быстродействию и к системе управления в целом, так как движение происходит не пошагово, а непрерывно. Вследствие того, что поворот происходит существенно быстрее, чем при использовании узла поворота в конструкции шагающего робота, то отпадает необходимость введения дополнительных приводов движения в направлении влево/вправо. Однако остается недостаток — невозможность преодоления препятствия путем его перехода и, вследствие этого, невозможность использования конструкции при большой его длине.

Механическая система РВП (см. рис. 3) состоит из корпуса 1 в виде перевернутой тарелки; блока двигателей, включающего два мотора постоянного тока 2 и два колеса 3; скользящего уплотнения 4, находящегося на нижней поверхности корпуса; блока воздушного насоса 5 и камеры разрежения, находящейся во внутренней полости корпуса. Воздушный насос создает требуемое пониженное давление в камере разрежения для удержания платформы на наклонной поверхности. На рис. 3 стрелками показано направление движения воздуха в камере разрежения.

Требования к датчикам обнаружения препятствий робота конструкции второго типа непрерывного движения следующие: датчики должны охватывать зоны, равные габаритным размерам РВП плюс габаритные размеры РВП, умноженные на 0,2 с каждой стороны робота (рис. 4).

Такая конструкция предусматривает сканирование местности лазерным дальномером ДЗ. В этом случае достаточно иметь только один датчик, закрепленный на вращающейся оси. Это позволит получать информацию об обстановке, окружающей

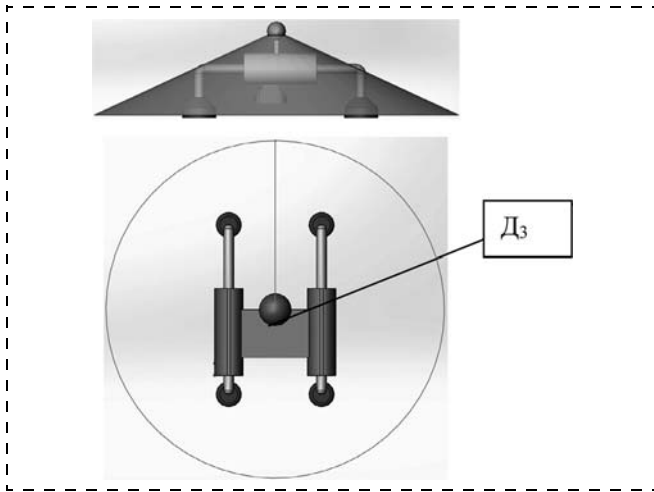


Рис. 4. Схема конструкции РВП, оснащенного лазерным дальномером

робот. Использование предлагаемого датчика возможно в ранее упомянутых конструкциях.

Целесообразность использования различных датчиков — ультразвуковых, лазерных дальномеров, видеосенсоров, одометров — обусловлена их техническими характеристиками, такими как быстродействие, разрешающая способность, рабочая зона, сложность обработки сигнала. В зависимости от технических характеристик эти датчики можно использовать в разных типах конструкций роботов.

2. Движение мобильного робота вертикального перемещения с обходом препятствий в изменяющейся во времени среде

Учитывая особенности конструкции и способов перемещения мобильных роботов, сделаем следующие допущения:

- робот снабжен необходимыми бортовыми датчиками, включая сканирующий лазерный дальномер дальней локации, систему объемного технического зрения, ультразвуковые датчики ближней локации, одометр;
- бортовая встроенная измерительно-информационная и управляющая система робота, получая информацию от датчиков о линейных и угловых координатах, о расстоянии от геометрического центра робота до препятствия и угловых координат препятствия, вычисляет относительные линейную и угловую скорости движения препятствия или любого объекта на пути робота в заданные дискретные моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_n$;
- на модули скорости препятствий накладываются ограничения:

$$|V_{pk}| \geq |V_{пк}|,$$

где V_{pk} и $V_{пк}$ — векторы скорости робота и препятствия соответственно; $|V_{pk}| = V_{pk}$, $|V_{пк}| = V_{пк}$;

- каждое из подвижных препятствий может связываться с другим препятствием в пределах ограниченного диапазона d_i ;

- каждое из подвижных препятствий представляется окружностью диаметром D на плоскости (x, y) , включая зону безопасности;
- робот и препятствие имеют точку встречи.

Измерение параметров движения проводится в дискретные моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_n$ с интервалом $[t_k, t_k + 1]$ и периодом T измерений:

$$t_k = t_{k-1} + kT. \quad (1)$$

По возможным траекториям 1 и 2 движения робота Р и одного подвижного препятствия П на плоскости (x, y) можно прогнозировать вероятную точку встречи В (рис. 5). Координаты предполагаемой точки встречи зависят от времени движения и скоростей, по которым определяются расстояния, проходимые роботом и препятствием. Значит, условием прохождения роботом Р предполагаемой точки встречи В можно считать нулевое приращение вектора расстояния между роботом и препятствием (рис. 5), т. е. $\Delta l = 0$ в абсолютной системе координат.

Методом экстраполяции возможно рассчитать место встречи робота и препятствия, зная их векторы скорости и отклонение координат траектории движения в плоскости (x, y) , полученные посредством измерительно-информационной системы. Расчет предполагаемой точки встречи выполняется компьютерной системой управления. Если относительные скорости в каждый момент времени t_k известны, то возможно определить и абсолютные скорости препятствия П, которое движется вдоль предполагаемой траектории. Система оценивает приращение пути вдоль траектории движения препятствия.

Приращение пути робота и препятствия за время t_k при известных скоростях V_{pk} и $V_{пк}$ в моменты времени $t_k = \Delta t$ рассчитывается по формулам

$$\begin{aligned} \Delta l_{A_1B} &= V_{pk} \Delta t \cdot \gamma_1; \\ \Delta l_{AB} &= V_{пк} \Delta t \cdot \gamma_2. \end{aligned} \quad (2)$$

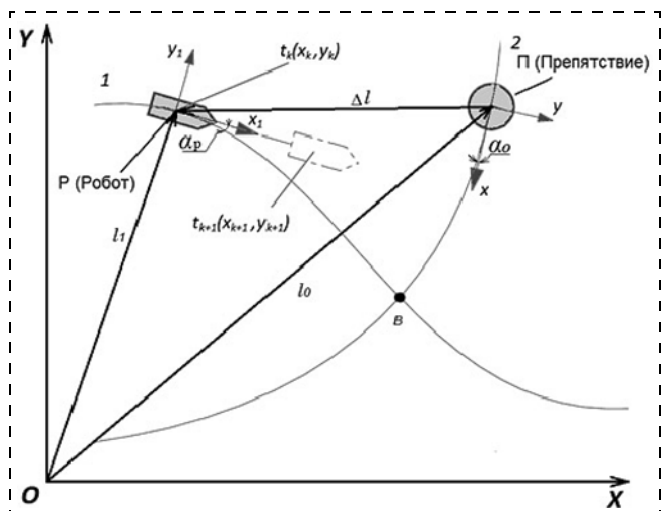


Рис. 5. Возможные траектории движения робота и одного подвижного препятствия на плоскости (x, y) в момент времени t_k и $t_k + 1$

Коэффициенты γ_1 и γ_2 учитывают кривизну траектории движения.

Посредством экстраполяции вычисляются координаты траекторий на $(k+1)$ -м шаге при известных координатах на k -м шаге:

- для робота

$$\begin{cases} X_{p(k+1)} = X_{pk} + \Delta X_p; \\ Y_{p(k+1)} = Y_{pk} + \Delta Y_p; \end{cases} \quad (3)$$

- для препятствия

$$\begin{cases} X_{n(k+1)} = X_{nk} + \Delta X_n; \\ Y_{n(k+1)} = Y_{nk} + \Delta Y_n \end{cases} \quad (4)$$

Оценка возможной точки встречи робота и препятствия в общем случае за число шагов $k+1$ определяется по формулам

$$\begin{cases} l_{AB(k+1)} = V_p t_k + V_{pk} \Delta t \cdot \gamma_1 = V_p t_{k+1}; \\ l_{A_1B(k+1)} = V_n t_k + V_{nk} \Delta t \cdot \gamma_2 = V_n t_{k+1}. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь V_p и V_n — усредненные скорости робота и препятствия.

Расстояния l_{AB} и l_{A_1B} в любой момент времени k получаются посредством триангулярной экстраполяции (рис. 6).

Предположим, что возможная точка встречи произойдет при равенстве времен движения робота и препятствия:

$$t_{pB} = l_{AB(k+1)} / V_p;$$

$$t_{nB} = l_{A_1B(k+1)} / V_n;$$

$$t_{pB} = t_{nB} = t_B.$$

Выражения $V_p \Delta t_B$ и $V_p t_B$, а также $V_n \Delta t_B$ и $V_n t_B$ должны рассчитываться на каждом шаге k .

Оценка взаимного положения робота и препятствия позволяет избежать их столкновений и, имея

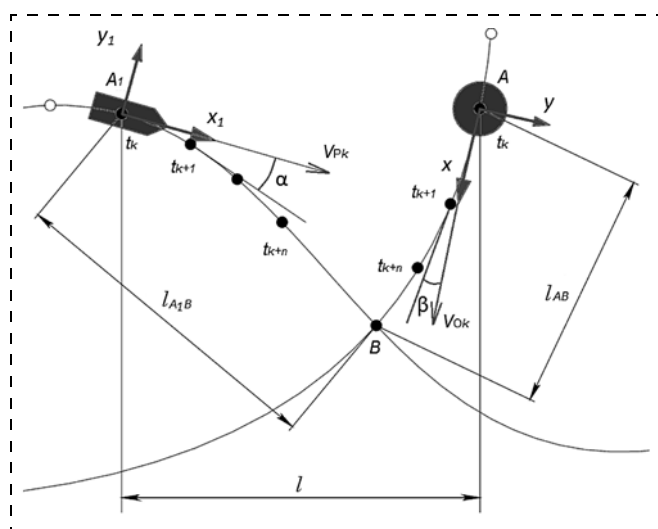


Рис. 6. Предполагаемая точка встречи B . Условие прохождения роботом предполагаемой точки встречи B с подвижным препятствием $l = 0$

информацию о движении, дает возможности роботу обойти препятствие в случаях $V_p t_B > V_n t_B$ или $V_p t_B < V_n t_B$.

Область безопасности R вблизи точки B , обеспечивающая отсутствие столкновения, определяется из условия

$$\begin{cases} V_p t_B - V_n t_B \geq R; \\ V_n t_B - V_p t_B \geq R. \end{cases} \quad (6)$$

В зависимости от расстояния до предполагаемой или возможной встречи робота с подвижным препятствием вблизи точки B вырабатывается стратегия управления, которая определяется рядом правил в зависимости от расстояния до точки B , значениями скоростей движения робота и объекта. Кроме того, вычисляются расстояния l хотя бы на один шаг экстраполяции между роботом и препятствием.

Возможны определенные правила движения или маневрирования робота, позволяющие избежать столкновений, объединенные в стратегию движения. Приведем один из примеров маневрирования робота, в соответствии с которым разработаны алгоритмы управления:

- если $l > R$ и $V_p \geq V_n$, то робот может продолжать двигаться по своей траектории;
- если $l < R$ и $V_p \leq V_n$, робот должен остановиться;
- если $l = R$ и $V_p \geq V_n$, робот должен двигаться влево или вправо в зависимости от габаритных размеров и положения объекта;
- если $l = R$ и $V_p \leq V_n$, робот должен остановиться, затем двигаться влево или вправо, в зависимости от габаритных размеров и положения объекта.

3. Возможные алгоритмы управления робота вертикального перемещения с учетом его эксплуатационных параметров и ограничений, накладываемых на его движение

Рассмотрим алгоритм (рис. 7), при котором после получения роботом информации от оператора о перемещении в определенную область на местности робот определяет координаты цели и начинает планирование своего движения. Кратчайшее расстояние между двумя точками на плоскости — отрезок прямой. Роботу необходимо совершить поворот для того, чтобы вектор направления движения совпадал со спланированной траекторией. При совершении маневров робот должен определять свое текущее положение относительно поставленной цели и завершить программу перемещения после того, как текущее положение робота совпадет с целевым.

При планировании перемещения робота на местности задействуется алгоритм (рис. 8), который начинает работу со сканирования местности для нахождения ближайших объектов. Сканирование проводится лазерным дальномером либо ультразвуковым датчиком в определенном диапазоне перед роботом с малой периодичностью. Координаты ближайших объектов записываются в память ЭВМ для дальнейшего сравнения и обработки. Вычис-

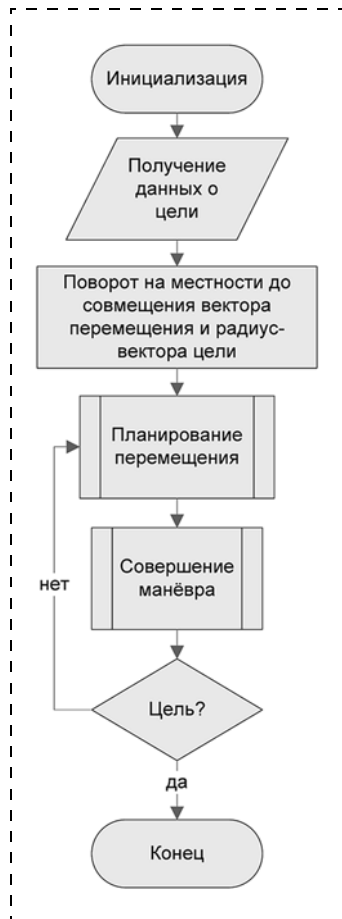


Рис. 7. Алгоритм начала движения

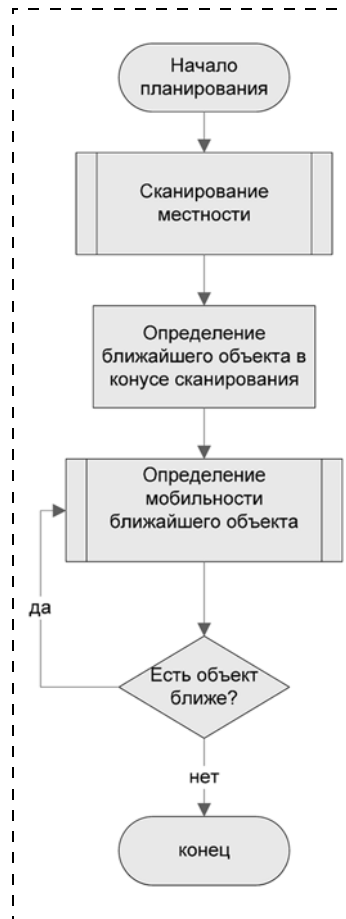


Рис. 8. Алгоритм определения местоположения



Рис. 9. Алгоритм определения движения объекта



Рис. 10. Алгоритм определения направления движения объекта

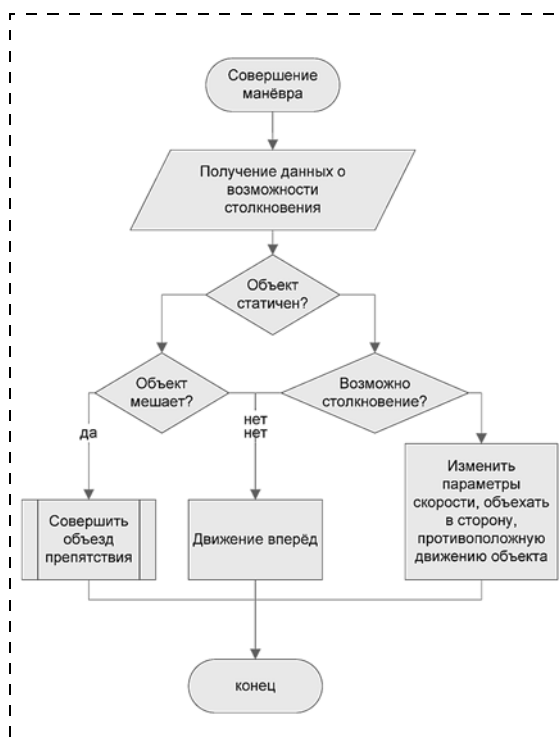


Рис. 11. Алгоритм маневра робота

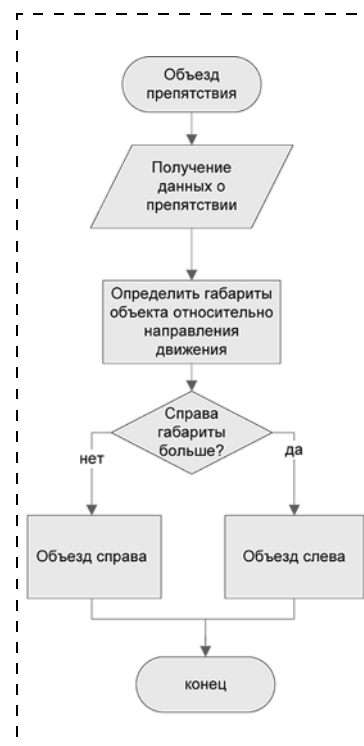


Рис. 12. Алгоритм объезда препятствия

ляются векторы относительных скоростей и ускорений ближайших объектов в системе координат, связанной с роботом.

Вывод о выполнении движения объекта (рис. 9) делается на основании сравнения трех последовательных кадров сканирования, что позволяет с заданной погрешностью измерения выяснить, находится ли объект в движении или он неподвижен. Если координаты объекта не изменяются в процессе сканирования, то программа делает вывод о статичности препятствия. Дальнейший шаг — выяснить, находится ли препятствие на пути движения робота, после чего принимается решение о маневре. Если же кадры не идентичны друг другу в пределах погрешности, то программа делает вывод о движении объекта. Следующей задачей становится определение скорости, ускорения и направления движения объекта.

Определение параметров движения объекта начинается с определения смещения по кадрам и задержке (рис. 10). Полученные координаты сравниваются по знаку и модулю. Таким образом, определяется направление движения объекта. Программе необходимо определить возможное столкновение с объектом методом экстраполяции и затем совершить необходимый маневр.

Совершение маневра роботом (рис. 11) инициализируется с использованием полученных данных об объекте. Статичные, а также динамичные объекты, не мешающие движению, игнорируются. Препятствие на пути робота вызывает подпрограмму объезда, а динамичное препятствие, столкновение с которым неминуемо, заставит программу изменить параметры движения робота для того, чтобы избежать этого столкновения.

Объезд статичного препятствия происходит с той стороны (рис. 12), где меньше габаритные размеры относительно движения по запланированной траектории, что позволяет уменьшить энергозатраты.

Закключение

Рассматривается движение мобильного робота вертикального перемещения в среде с неподвижными или подвижными препятствиями при ограничениях на скорости движения робота и препятствий с учетом особенностей транспортной и измерительно-информационной системы робота. Приводятся оценки движения при выбранной стратегии движения робота. Предложены алгоритмы управления, обеспечивающие обход возможных возмущений и препятствий.

Список литературы

1. Градецкий В. Г., Вешников В. Б., Калиниченко С. В., Кравчук Л. Н. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно расположенным в пространстве поверхностям. М.: Наука, 2001. 369 с.
2. Chernousko F. L., Gradetsky V. G. Principles of movement and problem of dynamics of mobile robots. Sourcebook of the Inter-

national Exhibition Congress "Mechatronics and Robotics", MIR-07, LenExpo, 2007. P. 89–90.

3. Balakguer C. Robotics and Automation in Construction. Croatia: In-Teh, 2008. P. 295–306.

4. Градецкий В. Г., Князьков М. М., Фомин Л. Ф., Чашу-хин В. Г. Механика миниатюрных роботов. М.: Наука, 2010. 271 с.

5. Bridge B., H. E. Leon Rodriguez, Mondal S. C., Sattar T. P. Field trials of a cell of climbing cooperating robots for fast and flexible manufacturing of large scale engineering structures // Proc. of the CLAWAR 2009 Internat. Conf., edited by O. Tosun, H. Akin, M. O. Tokhi, G. S. Virk. Istanbul, World Scientific Publishing. P. 801–810.

6. Shang J., Bridge B., Sattar T., Mondal S., Brenner A. Development of a climbing robot for the NDT of long weld lines // Industrial Robot: An International Journal. V. 35, Iss. 3, May (2008). P. 217–223.

7. Yoned K., Ota Y., Hirano K., Hirose S. Development of a light-weight wall climbing quadruped with reduced degree of freedom // Proc. of CLAWAR 2001 International Conference. September, 2001. Professional Engineering Published Ltd., London UK. P. 907–912.

8. Luk B. L., Collie A. A., Billingsley J. Robug II: an intelligent wall climbing robot // Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation, Sacramento, California, USA. 1991. V. 3. P. 2342–2347.

9. Grieco J. C., Prieto M., Armada M., Gonzalez de Santos P. A six-legged climbing robot for high payloads // Proc. of the 1998 IEEE Internat. Conf. on Control Applications, Trieste, Italy. 1998. V. 1. P. 446–450.

10. Akhtaruzzaman M., N. Izzati Bt Samsuddin, N. Bt Umar, Rahman M. Design and development of a wall climbing Robot and its control system // Proc. of the 12th Internat. Conf. on Computers and Information Technology, Dhaka, Bangladesh. 2009. P. 309–313.

11. Fu Y., Li Z., Wang S. A wheel-leg hybrid wall climbing robot with multi-surface locomotion ability // Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Mechatronics and Automation. 2008. P. 1393–1398.

12. Zhang Y., Dodd T., Atallah K., Lyne I. Design and optimization of magnetic wheel for wall and ceiling climbing robot // Proc. of the Internat. Conf. on Mechatronics and Automation, Xi'an, China, 2010.

13. Minakata H., Hayashibara Y., Ichizawa K., Horiuchi T., Fukuta M., Fujita S., Kaminaga H., Irje K., Sakamoto H. A method of single camera robocup humanoid robot localization using cooperation with walking control // Proc. of the 10th IEEE Internat. Workshop on Advanced Motion Control. 2008. P. 50–55.

14. Junhong J., Indiveri G., Ploeger P., Bredenfeld A. An omnivision based self-localization method for soccer robot // Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 2003. P. 276–281.

15. Calabrese F., Indiveri G. An Omni-Vision Triangulation-Like Approach to Mobile Robot Localization // Proc. of the IEEE Internat. Symposium on Intelligent Control, Limassol, Cyprus. 2005. P. 604–609.

16. Gradetsky V. G., Veshnikov V. B., Chashchukhin V. G. Simulation using a mobile multilink robot with a virtual reality vision system // Using robots in hazardous environments. Wood head Published Limited, 2011. P. 499–519.

17. Deport M., Floquest T., Perruquetti W., Kokosy A., Palos J. A decentralized planning architecture for a swarm of mobile robots // Using robots in hazardous environments. Woodhead Published Limited, 2011. P. 575–590.

18. Shenata H. H., Schlattman J. Adaptive Mobile Robot Path Planning Based Algorithm for Dynamic Environments // Adaptive mobile robotics. Proc. of 13 CLAWAR Conference, Baltimore, USA, 23–26 July 2012. P. 145–153.

19. Бурдаков С. Ф., Мирошник И. В., Стельмаков Р. Э. Системы управления движением колесных роботов. СПб.: Наука, 2001. 230 с.

20. Chin-Teng Lin, C. S. George Lee. Neural Fuzzy Systems a Neuro-Fuzzy Sinergism to Intelligent System. NJ, USA: Prentice Hall PRT, Upper Saddle River. 795 p.

21. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1978. С. 144–145.

22. Теория нелинейных и специальных систем управления. М.: Высш. шк., 1986. 504 с.

23. Кулешев В. С., Лакота Н. А. Динамика систем управления манипуляторами. М.: Энергия, 1971. 304 с.

24. Park J. H., and Kang J. Y. Fuzzy-Logic Controller for a two-link Flexible Manipulator // Proc. of 2nd control conference, Seoul, Korea, July 1997. V. 3. P. 435–438.

Mobile Robot's Movement on Vertical and Horizontal Surfaces and Slopes in the Conditions of External Disturbances and Existing Moving Objects

V. G. Gradetsky, gradet@ipmnet.ru, M. M. Knyazkov,

E. A. Semionov, A. N. Sukhanov, sukhonov-artiom@yandex.ru, Institute for Problems in Mechanics named A. Yu. Ishlinski of the Russian Academy of Sciences, 119526, Moscow, Russian Federation

Date received: 25.11.14

Mobile robot's motion control on different uneven surfaces under the influence of the external forces in unidentified environment has been analyzed. The mobile robotic platform consists of two parts — the external one and internal one. The relative movement of these parts causes movement of the robotic platform. The robot has pneumatic power source and a set of suction caps for different walls. The environment may include various moving and static obstacles which robot should avoid while moving. The robotic platform has its safe zone defined by robot's and obstacles' speed limits to prevent a crash. Any moving obstacle has its own trajectory and overall dimensions, which could be calculated by processing the data from the vision system. The vision system of the robot consists of a set of sensors: a laser scanner, an ultrasonic sensor and a camera. The robot's control system receives complex data from the sensors and calculates the linear and angular velocities of the robotic platform and the nearest obstacles, and, using its database, decides what behavior model should be applied. Different situations of the robot's and obstacles' relative positions with various values of the relative speed were analyzed. The strategy of the roundabout ways uses the data from the robot's sensors. The motion control algorithms for detouring of the moving and static obstacles were proposed. They envision different situations, which can happen on a wall while the robot moves to the point of destination.

Keywords: mobile robot, horizontal and vertical surfaces, slope, external forces, unidentified environment, detouring algorithms

For citation:

Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Semionov E. A., Sukhanov A. N. Mobile Robot's Movement on Vertical and Horizontal Surfaces and Slopes in the Conditions of External Disturbances and Existing Moving Objects, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 166–173.

DOI: 10.17587/mau.16.166-173

References

1. Gradetsky V. G., Veshnikov V. B., Kalinichenko S. V., Kravchuk L. N. *Upravlaemoe dvizhenie mobilnykh robotov po proizvolno raspolzhenim v prostranstve poverkhnostiam* (Operated movement of mobile robots on the surfaces randomly focused in space), Moscow, Nauka, 2001, 369 p. (in Russian).
2. Chernousko F. L., Gradetsky V. G. Principles of movement and problem of dynamics of mobile robots, *Proceedings of International Conference "Mechatronics and Robotics"*, Saint-Petersburg, 2007, pp. 89–90.
3. Balakuer C. Robotics and Automation in Construction, Croatia, In-Teh, 2008, pp. 295–306.
4. Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Fomin L. F., Chashchukhin V. G. *Mekhanika miniaturnykh robotov* (Mechanics of miniature robots), Moscow, Nauka, 2010, 272 p. (in Russian).
5. Bridge B., Leon Rodriguez H. E., Mondal S. C., Sattar T. P. Field trials of a cell of climbing cooperating robots for fast and flexible manufacturing of large scale engineering structures, *Proceedings of the CLAWAR 2009 International Conference*, Istanbul, World Scientific Publishing, pp. 801–810.
6. Shang J., Bridge B., Sattar T., Mondal S., Brenner A. Development of a climbing robot for the NDT of long weld lines, *Industrial Robot*, 2008, vol. 35, issue 3, pp. 217–223.
7. Yoned K., Ota Y., Hirano K., Hirose S. Development of a light-weight wall climbing quadruped with reduced degree of freedom, *Proceedings of the CLAWAR 2001 International Conference*, London UK, Professional Engineering Published Ltd., pp. 907–912.
8. Luk B. L., Collie A. A., Billingsley J. Robug II: an intelligent wall climbing robot, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, California, USA, 1991, vol. 3, pp. 2342–2347.
9. Grieco J. C., Prieto M., Armada M., Gonzalez de Santos P. A six-legged climbing robot for high payloads, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications*, Trieste, Italy, 1998, vol. 1, pp. 446–450.
10. Akhtaruzzaman M., Izzati Bt Samsuddin N., Bt Umar N., Rahman M. Design and development of a wall climbing Robot and its control system, *Proceedings of the 12th International Conference on Computers and Information Technology*, Dhaka, Bangladesh, 2009, pp. 309–313.
11. Fu Y., Li Z., Wang S. A wheel-leg hybrid wall climbing robot with multi-surface locomotion ability, *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Miami, Florida, 2008, pp. 1393–1398.
12. Zhang Y., Dodd T., Atallah K., Lyne I. Design and optimization of magnetic wheel for wall and ceiling climbing robot, *Proceedings of the International Conference on Mechatronics and Automation*, Xi'an, China, 2010, pp. 1393–1398.
13. Minakata H., Hayashibara Y., Ichizawa K., Horiuchi T., Fukuta M., Fujita S., Kaminaga H., Irje K., Sakamoto H. A method of single camera robocup humanoid robot localization using cooperation with walking control, *Proceedings of the 10th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Miami, Florida, 2008, pp. 50–55.
14. Junhong J., Indiveri G., Ploeger P., Bredenfeld A. An omnivision based self-localization method for soccer robot, *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Columbus OH, USA, 2003, pp. 276–281.
15. Calabrese F., Indiveri G. An Omni-Vision Triangulation-Like Approach to Mobile Robot Localization, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Limassol, Cyprus, 2005, pp. 604–609.
16. Gradetsky V. G., Veshnikov V. B., Chashchukhin V. G. Simulation using a mobile multilink robot with a virtual reality vision system, *Using Robots in Hazardous Environments*, Moscow, Woodhead Published Limited, 2011, pp. 499–519.
17. Deport M., Floquet T., Perruquetti W., Kokosy A., Palos J. A decentralized planning architecture for a swarm of mobile robots, *Using Robots in Hazardous Environments*, Moscow, Woodhead Published Limited, 2011, pp. 575–590.
18. Shenata H. H., Schlattman J. Adaptive Mobile Robot Path Planning Based Algorithm for Dynamic Environments, *Adaptive Mobile Robotics. Proceedings of 13 CLAWAR Conference*, Baltimore, USA, 2012, pp. 145–153.
19. Burdakov S. F., Miroshnik I. V., Stelmakov R. E. *Sistemi upravleniya dvizheniya kolesnykh robotov* (Wheel robot's movement control systems), Saint-Petersburg, Nauka, 2001, 230 p. (in Russian).
20. Lin C.-T., George Lee C. S. Neural Fuzzy Systems a Neuro-Fuzzy Sinergism to Intelligent System, Prentice Hall PRT, Upper Saddle River, NJ, USA, 1996, pp. 795.
21. Popov E. P. *Teoriya lineinykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya* (Linear systems of automatic control theory), Moscow, Nauka, 1978, pp. 144–145. (in Russian).
22. Voronov A. A. *Teoriya nelineinykh i spetsialnykh sistem upravleniya* (Nonlinear and special control systems theory), Moscow, Vysshaia shkola, 1986, 504 p. (in Russian).
23. Kuleshov V. S., Lakota N. A. *Dinamika sistem upravleniya manipulatorami* (Dynamics of manipulator's control systems), Moscow, Energia, 1971, 304 p. (in Russian).
24. Park J. H. and Kang J. Y. Fuzzy-Logic Controller for a two-link Flexible Manipulator, *Proceeding of 2nd Control Conference*, Seoul, Korea, 1997, vol. 3, pp. 435–438.

Corresponding author:

Gradetsky Valery G., Chief Researcher, Institute for Problems in Mechanics named A. Yu. Ishlinski of the Russian Academy of Sciences, 119526, Moscow, Russian Federation, e-mail: gradet@ipmnet.ru

Особенности компьютерного моделирования в реальном времени процесса торможения автомобильного колеса

Рассмотрены условия, необходимые для численного моделирования процесса торможения автомобильного колеса в реальном времени. Проведен анализ результатов использования некоторых из наиболее распространенных численных методов, которые используются для этой цели. Предложена новая методика расчета параметров процесса торможения автомобильного колеса, базирующаяся на адаптации системы к процессу интегрирования за счет применения переменного шага интегрирования. Показано, что использование предлагаемой методики позволяет сократить время расчета за счет увеличения шага интегрирования без увеличения погрешности рассчитываемых параметров.

Ключевые слова: автомобильное колесо, торможение, математическое моделирование, численные методы, адаптация системы к процессу интегрирования, переменный шаг интегрирования, сокращение времени расчета

Введение

Для исследования тормозной динамики автомобиля в настоящее время, по опыту большинства исследователей, используется комплексная (расчетно-экспериментальная) технология моделирования [3, 10, 17], заключающаяся в следующем. Комплекс состоит из стенда, включающего элементы кузова и шасси реального автомобиля, а также компьютерный имитатор движения этого автомобиля. Компьютерными методами задается внешнее возмущающее воздействие на виртуальную модель движущегося автомобиля, рассчитываются параметры движения автомобиля и передаются на исполнительные устройства стенда, воздействующие на реальные элементы систем управления автомобилем посредством реальных автоматизированных систем управления (ABS, ESP и т. д.). Для правильного воспроизведения "поведения" автомобиля на виртуальной дороге необходимо, чтобы суммарное время расчета и срабатывания исполнительных устройств не превышало времени реального течения процесса.

При расчете параметров движения автомобиля используются численные методы решения дифференциальных уравнений движения. При построении моделей движения необходимо соблюдать некоторые требования, которым должна соответствовать модель. Большинство исследователей, которые изучают методику математического моделирования и возможность ее применения для данного класса задач, выделяют следующие наиболее важные показатели эффективности, которые определяют требования к модели [1, 3, 4, 6, 7, 10–14, 17]:

1. Затраты машинного времени. В связи с использованием ЭВМ различного типа суммарные затраты складываются из времени ввода и вывода данных для каждого алгоритма моделирования, времени

на проведение вычислительных операций с учетом числа обращений к оперативной памяти и внешним устройствам, а также сложности каждого моделирующего алгоритма (число арифметических операций). Расчет затрат машинного времени может уточняться по мере отладки программы и накопления опыта у исследователя при работе с моделью.

2. Точность и достоверность результатов моделирования (адекватность модели исследуемому реальному объекту).

Таким образом, с течением времени для исследователей-автомобилистов [2, 4, 7, 9, 11–13, 17] и специалистов из других областей [8, 15, 16] все большую важность приобретает вопрос об обеспечении работы моделирующего комплекса в реальном времени. Возможность моделирования затормаживаемого колеса в реальном времени является важной задачей, которая до сих пор не решена, а снижение вычислительных затрат на сегодняшний день возможно лишь за счет снижения точности значений рассчитываемых параметров. До сих пор нет общих рекомендаций о том, как обеспечить возможность моделирования в реальном времени, т. е. приблизить время машинного расчета параметров модели к реальному времени процесса. Особое значение указанная проблема имеет при использовании комплексной технологии моделирования, так как работа моделирующей установки происходит в реальном времени и быстрее определяет принципиальную возможность применения комплексной технологии моделирования. В связи с этим необходимо дальнейшее исследование возможности снижения вычислительных затрат машинного времени при использовании комплексной технологии моделирования процесса торможения автомобильного колеса.

Методы и подходы

Инженеры в области автомобильного транспорта для исследования динамики процесса торможения используют самые разные модели автомобиля. Такие модели можно разделить на следующие классы:

1) пространственные — для учета влияния действующих в горизонтальной плоскости поворачивающих моментов, возникающих за счет неравенства тормозных сил и боковых реакций на траекторию движения автомобиля и, как следствие, крена кузова и перераспределения нормальных реакций. Так, в работе [12] модели этого типа применялись для выбора структуры управления тормозными моментами за счет применения схемы антиблокировочной системы (АБС);

2) плоские (типа "велосипед") — для учета динамики изменения нормальных нагрузок при дифференце кузова, в частности, для исследования колебаний элементов автомобиля с АБС [13];

3) плоские горизонтальные для прогнозирования управляемости колесной машины [18];

4) модели класса "колесо"; используются и как самостоятельные для отработки алгоритмов управления АБС [4, 7, 12, 13], и как элементы всех вышеперечисленных моделей для адекватного воспроизведения тормозных сил на колесах автомобиля.

При исследовании тормозной динамики автомобиля модель класса "колесо" занимает важнейшее место, поскольку она исследуется как сама по себе для моделирования поведения основных параметров торможения, так и в качестве составной части в более сложных моделях. Это один из наиболее динамичных модулей, которые вызывают наибольшие сложности при их математическом описании, что затрудняет решение модели в целом и может привести к значительным затратам времени на расчет модели и к снижению точности моделирования. В связи с этим в данной работе для исследования процесса торможения в качестве основной использовалась модель одиночного колеса автомобиля.

Процесс торможения одиночного колеса обычно представляется следующей системой уравнений [4, 7, 11–13, 17]:

$$\begin{cases} M = f(t) — \text{закон нарастания тормозного момента;} \\ \dot{\omega} = \frac{1}{j} [-M + \varphi mgr] — \text{уравнение движения колеса;} \\ \omega = \omega_0 + \int \dot{\omega} dt — \text{изменение угловой скорости колеса;} \\ \dot{v} = -\varphi g — \text{замедление оси колеса;} \\ v = v_0 + \int \dot{v} dt — \text{изменение скорости оси колеса;} (1) \\ s = 1 - \frac{\omega r}{v} — \text{коэффициент продольного скольжения колеса;} \\ \varphi = \frac{f_0 s}{as^2 + bs + c} — \text{эмпирическая зависимость для} \\ \text{расчета коэффициента продольного сцепления,} \end{cases}$$

где t — текущее значение времени процесса; M — тормозной момент, приложенный к колесу; ω_0 , v_0 —

начальные значения угловой и линейной скоростей колеса; $\dot{\omega}$, ω — угловое ускорение и скорость колеса; $\dot{v}$, v — линейное ускорение и скорость оси колеса; j , m — момент инерции колеса и масса, приходящаяся на колесо; g — ускорение свободного падения; r — динамический радиус колеса; φ — коэффициент сцепления между колесом и дорогой в продольном направлении; S — коэффициент продольного скольжения колеса; a , b , c — эмпирические коэффициенты; f_0 — коэффициент продольного сцепления при состоянии колеса — "юз" (коэффициент сопротивления скольжению колеса при известном состоянии поверхности дороги).

В соответствии с целью и задачами исследования для системы (1) приняты следующие традиционные допущения [4, 5, 7, 10, 11]:

- торможение происходит по прямолинейной траектории;
- поверхность дороги — ровная, горизонтальная, бесконечно жесткая;
- контакт шины с дорогой точечный;
- сила аэродинамического сопротивления равна нулю;
- вертикальная нагрузка на колесо имеет постоянное значение;
- динамический радиус колеса имеет постоянное значение;
- значение коэффициента сопротивления качению колеса равно нулю;
- коэффициент сцепления колеса с дорогой при состоянии колеса "юз" имеет постоянное значение.

Исходные данные и постоянные величины, принятые в системе (1), приведены в табл. 1.

Таблица 1
Исходные данные и постоянные величины, принятые для решения системы (1)

Наименование	Обозначение	Значение
Значение линейной скорости в начальный момент времени	v_0	20 м/с
Линейное и угловое ускорение в начальный момент времени	$\dot{\omega}_0$, $\dot{v}_0$	0
Момент инерции колеса ВАЗ-2106	j	$0,9 \text{ м} \cdot \text{с}^2$
Масса, приходящаяся на колесо ВАЗ-2106	m	350 кг
Ускорение свободного падения	g	$9,8 \text{ м/с}^2$
Динамический радиус колеса ВАЗ-2106	r	0,285 м
Эмпирические коэффициенты для состояния дорожной поверхности "сухой асфальтобетон"	a ; b ; c ; f_0	0,342; 0,612; 0,046; 0,7
Эмпирические коэффициенты для состояния дорожной поверхности "сухой асфальтобетон"	a ; b ; c ; f_0	0,4; 0,584; 0,016; 0,4
Эмпирические коэффициенты для состояния дорожной поверхности "лед"	a ; b ; c ; f_0	0,057; 0,398; 0,032; 0,1
Значение тормозного момента в начальный момент времени	M_0	0
Перед началом торможения проскальзывание равно нулю	$\omega_0 = \frac{v_0}{r}$	
Закон изменения тормозного момента [5]	$M(t) = 4500t$ — для режима экстренного торможения	

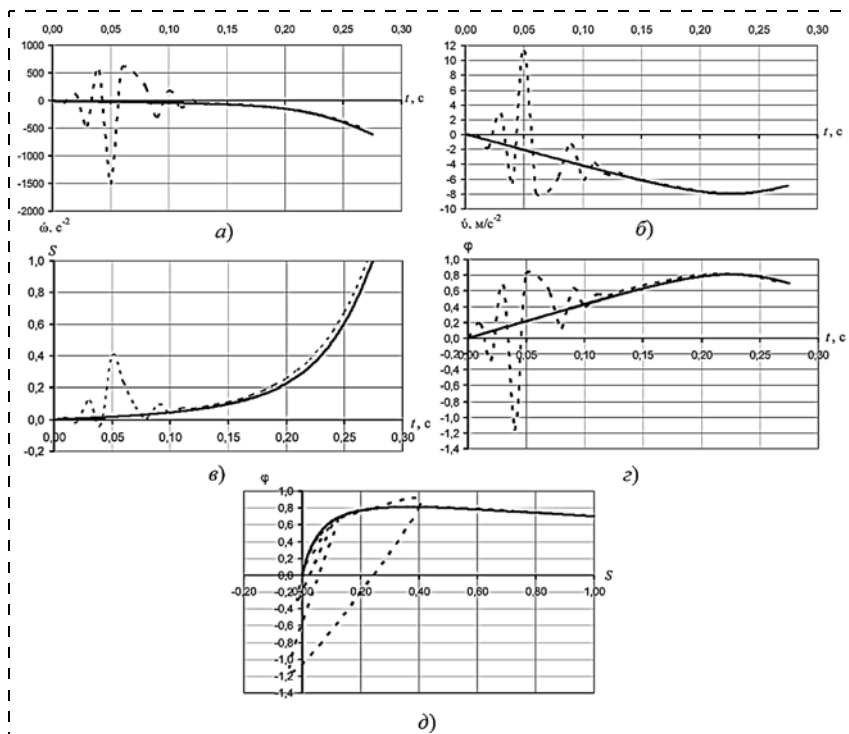


Рис. 1. Зависимости расчетных параметров торможения автомобильного колеса на поверхности типа "сухой асфальтобетон" для разных шагов интегрирования при использовании неявного метода Эйлера (— — шаг интегрирования равен 0,001 с, - - - шаг интегрирования равен 0,01 с):

а — зависимость углового ускорения от времени процесса торможения; **б** — зависимость линейного ускорения от времени процесса торможения; **в** — зависимость коэффициента относительного проскальзывания от времени процесса торможения; **г** — зависимость коэффициента сцепления от времени процесса торможения; **д** — зависимость коэффициента сцепления от коэффициента относительного проскальзывания

В этой таблице момент инерции колеса, масса, приходящаяся на колесо, динамический радиус колеса соответствуют значениям, характерным для колес автомобилей ВАЗ.

Расчет параметров системы (1) проводился с использованием неявного метода Эйлера, как одного из наиболее подходящих [17].

Результаты расчета показаны на рис. 1.

Как видно из рис. 1, при использовании шага интегрирования 0,01 с имеет место явление неустойчивости решения, причем для разных параметров оно проявляется с разной интенсивностью.

При проведении аналогичных расчетов для дорожной поверхности типа мокрый асфальтобетон неустойчивость выражена гораздо более сильно, а для дорожного покрытия типа лед неустойчивость отсутствует.

В работе [1] показано, что применение любых численных методов приводит к возникновению определенных погрешностей расчета искомых параметров. Значение и изменение этой погрешности в процессе моделирования зависят от численного метода, шага интегрирования, алгоритма расчета, погрешностей и значений исходных данных, закона изменения тормозного момента, типа и состояния дорожной поверхности, особенностей решаемой системы дифференциальных уравнений. Как было

показано в работах [1, 3], при использовании для решения системы (1) численных методов (на примере методов Эйлера, трапеций, Рунге—Кутты, Адамса, прогноза и коррекции) возникает погрешность решения, значение которой изменяется от 10 до 100 % с течением времени процесса при использовании любого шага интегрирования. Там же было показано, что при решении системы (1) с шагом интегрирования 0,005 с и более (в зависимости от метода решения) возникает явление неустойчивости решения, которое делает невозможным исследование процесса и использование рассчитываемых значений параметров системы (1) для вырабатывания управляющих сигналов. Как было показано в работе [1] и как видно из рис. 1, неустойчивость расчета параметров системы (1) проявляется на начальном интервале времени процесса торможения, и максимальные значения погрешностей также имеют место на этом же интервале. Таким образом, начальный интервал является наиболее проблематичным для численного расчета параметров системы (1).

В связи с этим авторами данного исследования была предложена особая методика расчета параметров системы (1) на начальном интервале расчета,

заключающаяся в адаптации системы к процессу интегрирования. Суть предлагаемой методики заключается в использовании разных шагов интегрирования для расчета параметров системы (1). Предлагается на начальном интервале расчета использовать шаг интегрирования 0,001 с, а дальнейший расчет проводить с шагом интегрирования 0,01 с.

Для реализации предлагаемой методики необходимо определить продолжительность начального интервала расчета, на котором будем использовать шаг интегрирования, равный 0,001 с (далее будем называть этот интервал "начальным"). Продолжительность "начального" интервала времени зависит от закона изменения тормозного момента и типа дорожной поверхности. Четких рекомендаций по определению продолжительности "начального" интервала на данном этапе исследования не сформулировано. Предлагается для определения продолжительности "начального" интервала провести тестовые расчеты и графическим способом выявить интервал, на котором имеет место неустойчивость. Продолжительность "начального" интервала предлагается выбирать таким образом, чтобы она составляла от 80 до 100 % интервала, на котором проявляется неустойчивость.

Для подтверждения возможности использования такой методики были выполнены соответст-

вующие расчеты. Были проанализированы следующие типы дорожного покрытия:

- сухой асфальтобетон,
 - мокрый асфальтобетон,
 - лед
- и следующие режимы торможения:
- экстренный режим торможения ($M(t) = 4500t$),
 - режим торможения с интенсивностью в пять раз меньшей, чем при экстренном торможении ($M(t) = 900t$),
 - с интенсивностью в десять раз меньшей, чем при экстренном торможении ($M(t) = 450t$).

Анализ результатов исследования

На основе предложенной методики были определены продолжительности "начальных" интервалов, которые представлены в табл. 2.

Результаты расчетов параметров системы (1) для разных сочетаний закона изменения тормозного момента и типа дорожного покрытия представлены на рис. 2...7. Как видно из этих рисунков, применение переменного шага интегрирования оказывает неодинаковое влияние на расчет параметров системы (1) в зависимости от типа дорожного покрытия и закона изменения тормозного момента.

В случае сочетания типа дорожного покрытия "мокрый асфальтобетон" и законов изменения тормозного момента $M(t) = 900t$ и $M(t) = 450t$ (рис. 5, 7), а также покрытия "сухой асфальтобетон" и закона изменения тормозного момента $M(t) = 450t$ (рис. 6) расчет параметров системы (1) с шагом интегрирования, равным 0,01 с, вообще не представляется возможным, поскольку, начиная со второго шага ин-

Таблица 2
Продолжительность "начального" интервала для разных типов дорожного покрытия и законов изменения тормозного момента для расчета параметров системы (1) с использованием неявного метода Эйлера

Тип дорожного покрытия	Закон изменения тормозного момента		
	$M(t) = 4500t$	$M(t) = 900t$	$M(t) = 450t$
Лед	Неустойчивость отсутствует	Неустойчивость отсутствует	Неустойчивость отсутствует
Сухой асфальтобетон	0,1 (0,27)	0,6 (1,05)	0,6 (1,8)
Мокрый асфальтобетон	0,1 (0,23)	0,3 (0,78)	0,6 (1,4)

Примечание. В скобках дано время наступления состояния "юз". Значения даны в секундах.

тегрирования, значения расчетных параметров получают значения, которые противоречат физическому смыслу рассматриваемого процесса торможения автомобильного колеса. Применение переменного шага интегрирования позволяет для такого сочетания типа дорожного покрытия и законов изменения тормозного момента получить представление о значениях и изменении расчетных параметров системы (1), однако на существенном интервале времени процесса торможения (от 20 до 33 % времени всего анализируемого процесса) имеет место явление неустойчивости.

Использование переменного шага в этом случае позволяет рассчитать значения параметров системы (1) на существенном временном интервале (кроме интервала с неустойчивостью) и получить

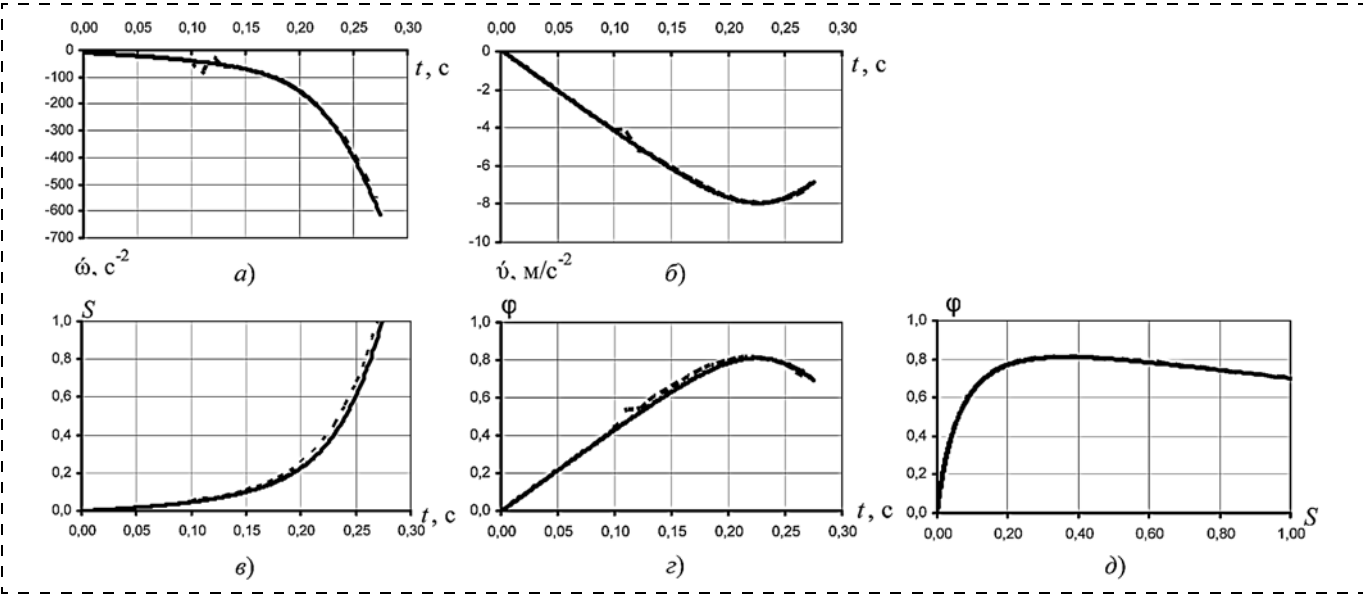


Рис. 2. Зависимости расчетных параметров торможения автомобильного колеса на поверхности типа "сухой асфальтобетон" и при законе изменения тормозного момента $M(t) = 4500t$ для разных шагов интегрирования при использовании неявного метода Эйлера (— шаг интегрирования равен 0,001 с, --- переменный шаг интегрирования, равен 0,001 с — 0,01 с): а — зависимость углового ускорения от времени процесса торможения; б — зависимость линейного ускорения от времени процесса торможения; в — зависимость коэффициента относительного проскальзывания от времени процесса торможения; г — зависимость коэффициента сцепления от времени процесса торможения; д — зависимость коэффициента сцепления от коэффициента относительного проскальзывания

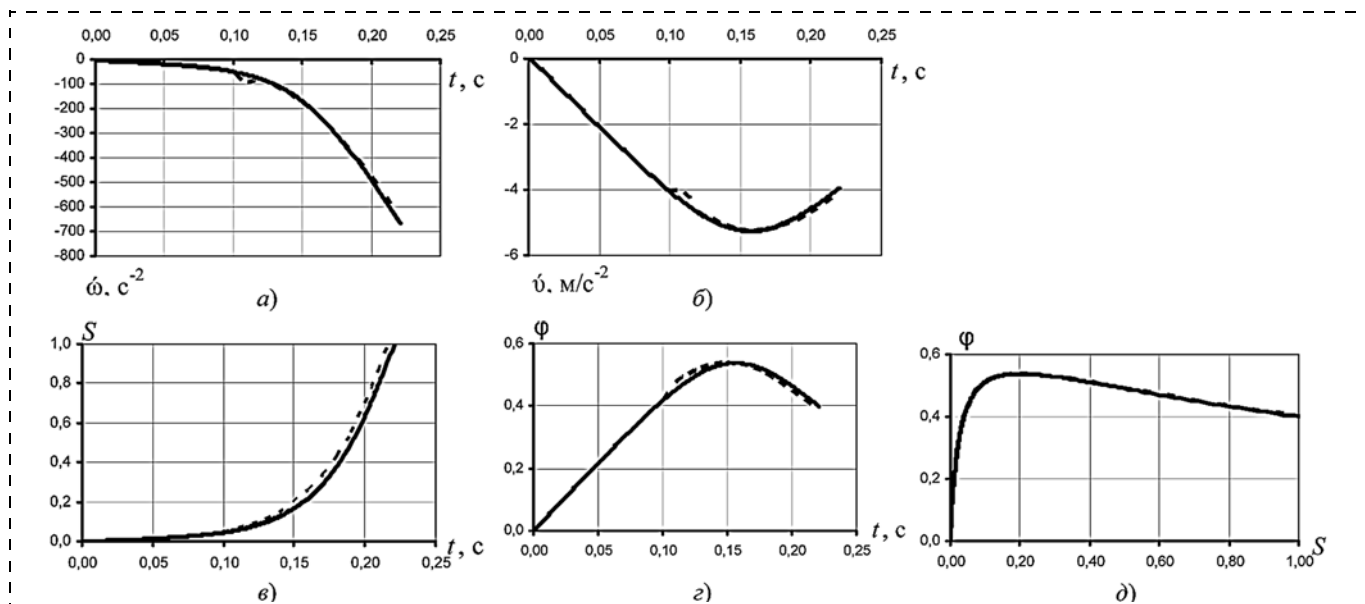


Рис. 3. Зависимости расчетных параметров торможения автомобильного колеса на поверхности типа "мокрый асфальтобетон" и при законе изменения тормозного момента $M(t) = 4500t$ для разных шагов интегрирования при использовании неявного метода Эйлера (— шаг интегрирования равен 0,001 с, --- переменный шаг интегрирования, равен 0,001 с — 0,01 с): а — зависимость углового ускорения от времени процесса торможения; б — зависимость линейного ускорения от времени процесса торможения; в — зависимость коэффициента относительного проскальзывания от времени процесса торможения; д — зависимость коэффициента сцепления от коэффициента относительного проскальзывания

значения параметров системы (1) в момент, когда колесо входит в состояние "юз", что было невозможно при использовании шага, равного 0,01 с.

В случае сочетания закона изменения тормозного момента $M(t) = 900t$ и типа дорожного покрытия "сухой асфальтобетон" (см. рис. 4) применение переменного шага интегрирования позволяет полно-

стью исключить явление неустойчивости, при этом расчетные значения параметров системы (1), соответствующие временному интервалу после окончания "начального", несущественно отличаются от значений этих же параметров, рассчитанных с шагом интегрирования, равным 0,001 с (из рис. 4 видно, что эти кривые накладываются друг на друга).

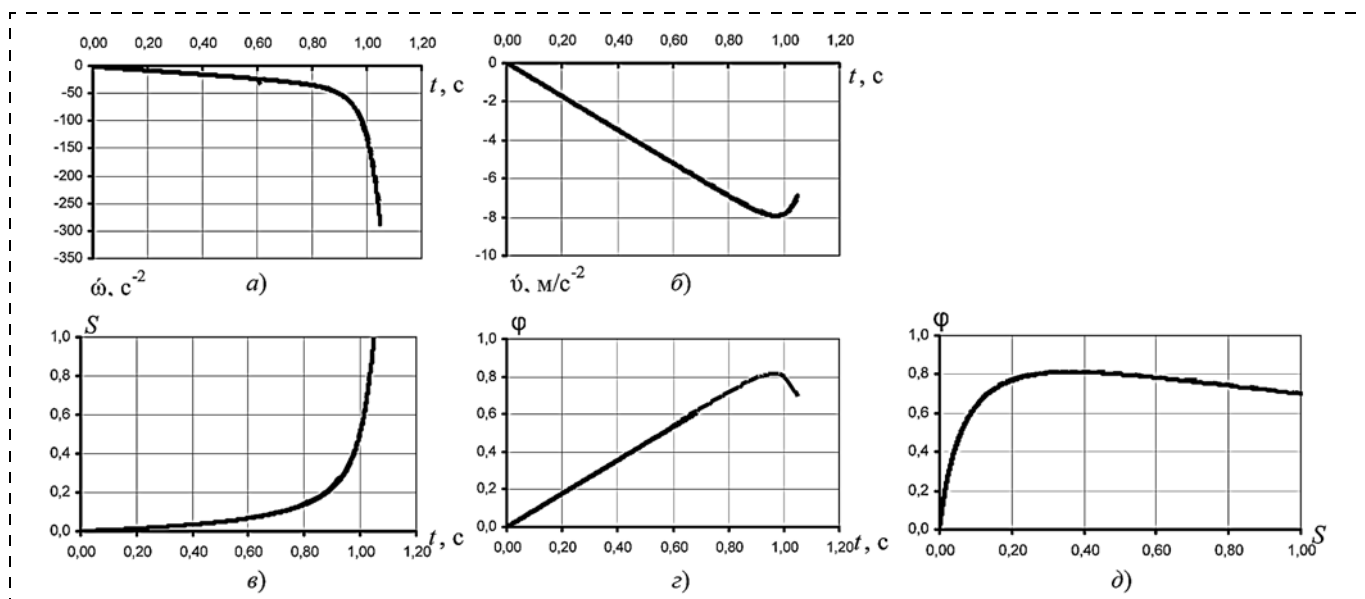


Рис. 4. Зависимости расчетных параметров торможения автомобильного колеса на поверхности типа "сухой асфальтобетон" и при законе изменения тормозного момента $M(t) = 900t$ для разных шагов интегрирования при использовании неявного метода Эйлера (— шаг интегрирования равен 0,001 с, --- переменный шаг интегрирования, равен 0,001 с — 0,01 с): а — зависимость углового ускорения от времени процесса торможения; б — зависимость линейного ускорения от времени процесса торможения; в — зависимость коэффициента относительного проскальзывания от времени процесса торможения; д — зависимость коэффициента сцепления от коэффициента относительного проскальзывания

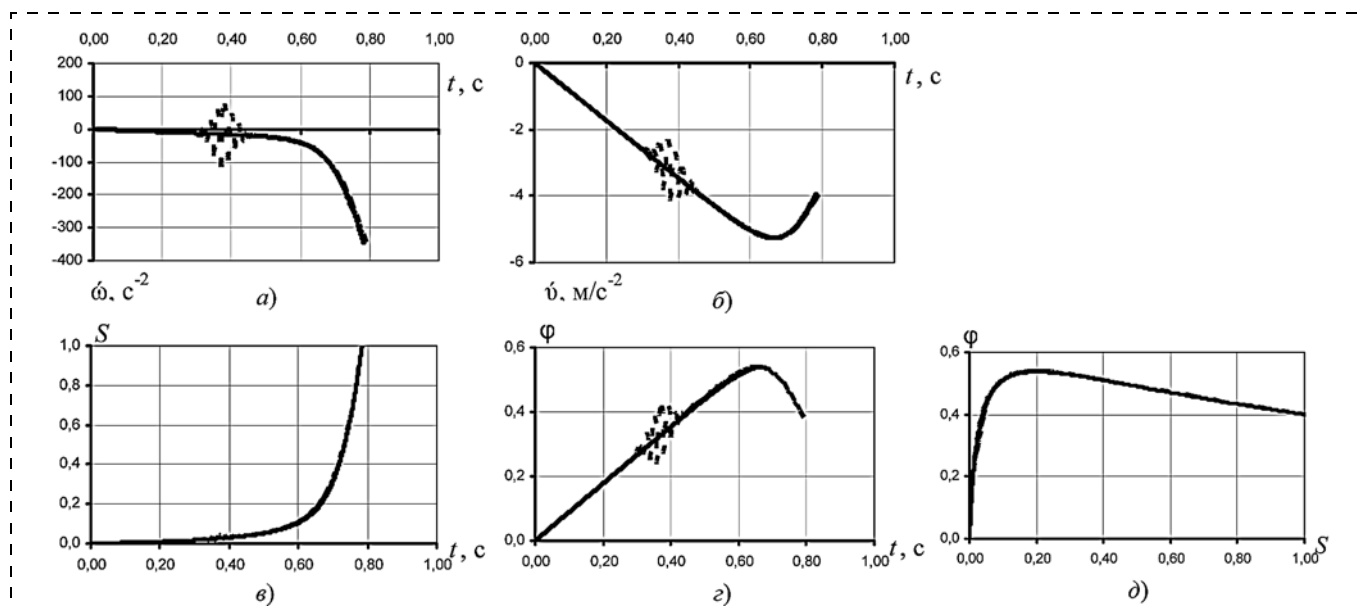


Рис. 5. Зависимости расчетных параметров торможения автомобильного колеса на поверхности типа "мокрый асфальтобетон" и при законе изменения тормозного момента $M(t) = 900t$ для разных шагов интегрирования при использовании неявного метода Эйлера (— шаг интегрирования равен 0,001 с, - - - переменный шаг интегрирования, равен 0,001 с — 0,01 с):

a — зависимость углового ускорения от времени процесса торможения; b — зависимость линейного ускорения от времени процесса торможения; e — зависимость коэффициента относительного проскальзывания от времени процесса торможения; z — зависимость коэффициента сцепления от времени процесса торможения; d — зависимость коэффициента сцепления от коэффициента относительного проскальзывания

В случае сочетания закона изменения тормозного момента $M(t) = 450t$ и типа дорожного покрытия "мокрый асфальтобетон" (см. рис. 6) применение переменного шага интегрирования не позволяет исключить явление неустойчивости, сокращается лишь интервал проявления неустойчивости расчета параметров системы (1).

Наибольший эффект от применения переменного шага достигается в случае сочетания закона изменения тормозного момента $M(t) = 4500t$, что соответствует экстремному режиму торможения, и типам дорожного покрытия "сухой асфальтобетон" и "мокрый асфальтобетон", что видно из рис. 2 и 3. Рассмотрим в сравнении зависимости, которые

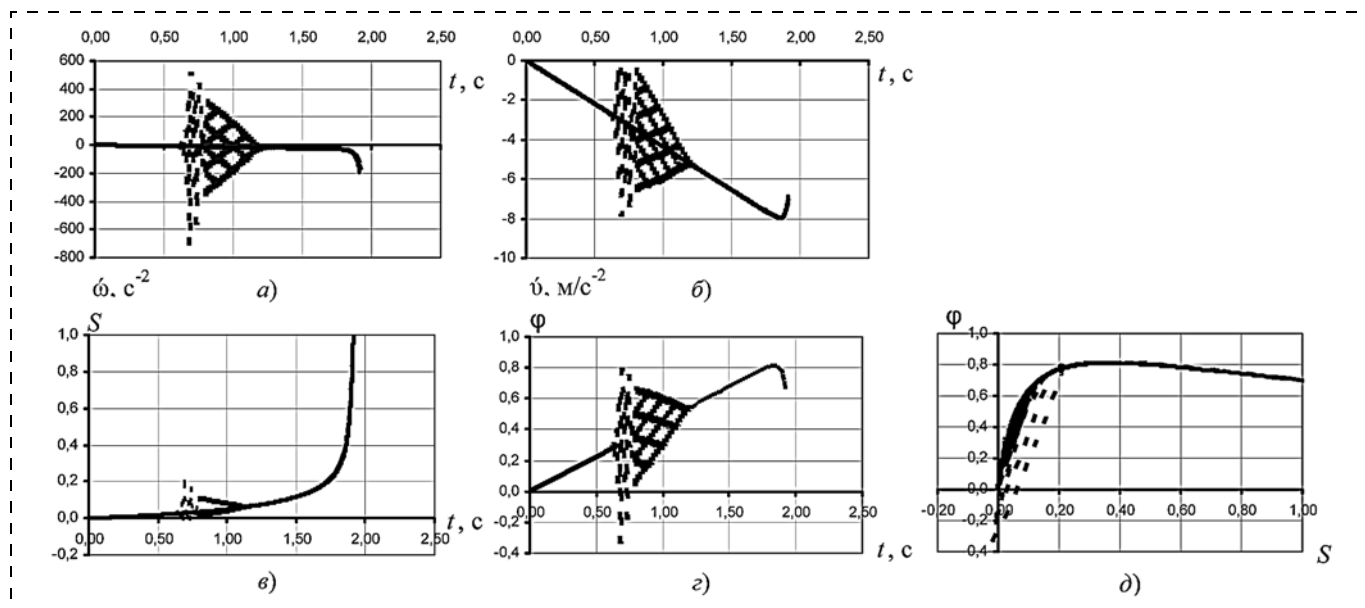


Рис. 6. Зависимости расчетных параметров торможения автомобильного колеса на поверхности типа "сухой асфальтобетон" и при законе изменения тормозного момента $M(t) = 450t$ для разных шагов интегрирования при использовании неявного метода Эйлера (— шаг интегрирования равен 0,001 с, - - - переменный шаг интегрирования, равен 0,001 с — 0,01 с):

a — зависимость углового ускорения от времени процесса торможения; b — зависимость линейного ускорения от времени процесса торможения; e — зависимость коэффициента относительного проскальзывания от времени процесса торможения; z — зависимость коэффициента сцепления от времени процесса торможения; d — зависимость коэффициента сцепления от коэффициента относительного проскальзывания

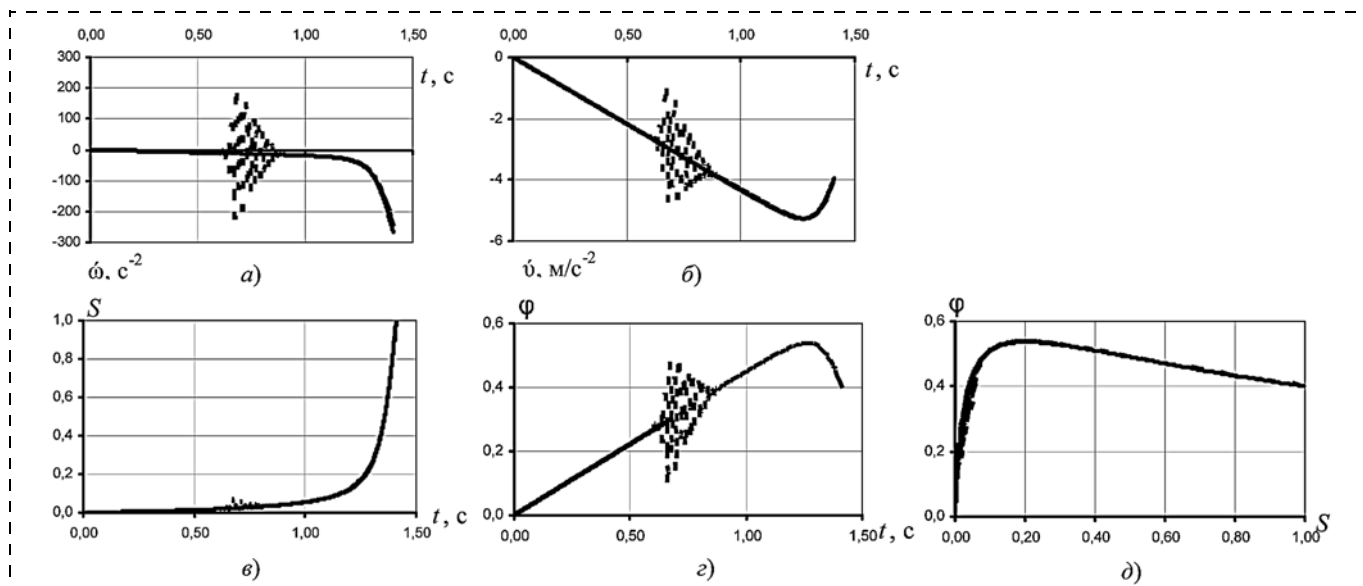


Рис. 7. Зависимости расчетных параметров торможения автомобильного колеса на поверхности типа "мокрый асфальтобетон" и при законе изменения тормозного момента $M(t) = 450t$ для разных шагов интегрирования при использовании неявного метода Эйлера (— шаг интегрирования равен 0,001 с, - - - переменный шаг интегрирования, равен 0,001 с — 0,01 с):

a — зависимость углового ускорения от времени процесса торможения; b — зависимость линейного ускорения от времени процесса торможения; v — зависимость коэффициента относительного проскальзывания от времени процесса торможения; g — зависимость коэффициента сцепления от времени процесса торможения; d — зависимость коэффициента сцепления от коэффициента относительного проскальзывания

представлены на рис. 1 и рис. 2. При использовании для расчета параметров системы (1) шага интегрирования 0,01 с неустойчивость проявляется на протяжении почти половины всего рассматриваемого процесса торможения и имеет существенную амплитуду, которая превышает значения этих же параметров, рассчитанных с шагом интегрирования, равным 0,001 с, более чем в десять раз (см. рис. 1). При использовании переменного шага интегрирования отклонения расчетных параметров системы (1) относительно рассчитанных с шагом интегрирования 0,001 с имеют место лишь в трех расчетных точках после окончания "начального" интервала (см. рис. 2), остальные значения рассчитываемых параметров системы (1) накладываются на значения, рассчитанные с шагом интегрирования 0,001 с.

Выводы

Применение переменного шага интегрирования в задачах моделирования процесса торможения автомобильного колеса позволяет:

1) почти полностью исключить явление неустойчивости расчета параметров системы (1) в случае моделирования экстренного торможения на поверхностях типа "сухой асфальтобетон" и "мокрый асфальтобетон" и в случае закона изменения тормозного момента $M(t) = 900t$ на дорожной поверхности типа "сухой асфальтобетон";

2) получить представление о значениях и характере изменения расчетных параметров системы (1) для законов изменения тормозного момента $M(t) = 900t$

и $M(t) = 450t$ на дорожной поверхности типа "мокрый асфальтобетон", рассчитать значения параметров системы (1) на всем интервале процесса торможения до наступления состояния "юз" колеса;

3) при использовании для расчета большего шага интегрирования сократить время расчета параметров торможения автомобильного колеса более чем в 10 раз.

Работа выполнена в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований № 14-08-00042А "Развитие исследования и моделирования взаимосвязанных явлений в контакте эластичного колеса с твердой опорой в новом представлении".

Список литературы

1. Зарубин В. С. Математическое моделирование в технике: учебник для вузов. 3-е изд. / Под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 496 с.
2. Зотов В. М., Зотов Н. М., Федин А. П. Некоторые задачи и пути совершенствования численного моделирования динамических процессов // Наземные транспортные системы: Межвуз. сб. науч. тр. Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2000. 148 с.
3. Зотов В. М., Зотов Н. М., Федин А. П. Проблемы численного моделирования динамических процессов в реальном времени и возможные пути их решения // Математика. Компьютер. Образование: сб. науч. трудов. 2000. Вып. 7, Ч. 2. С. 597—603.
4. Иванов В. В. Колебания автомобиля с антиблокировочной системой при торможении. Диссертация ... канд. техн. наук. Волгоград, 1986. 172 с.
5. Ким В. А. Методология создания адаптивных САБ АТС на основе силового анализа / Под ред. Р. И. Фурунжиева. Могилев: Белорусско-Российский университет, 2003. 344 с.
6. Кокорев Д. Ю. Программное обеспечение имитационного моделирования для виброиспытаний // Математическое моделирование и краевые задачи. Самара: Изд-во СамГТУ, 2004. Т. 2. № 5.

7. **Кранцов Г. П.** Оценка тормозных свойств автомобиля с автоматизированным приводом модельным методом. Диссертация ... канд. техн. наук. Волгоград, 1994. 146 с.
8. **Новосельцев В. Н.** Математическое моделирование и теория управления (над страницами книги А. А. Самарского и А. П. Михайлова "Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры"). Институт проблем управления РАН. URL: http://dkb.kazan.ru/00_1_1
9. **Пименов В. Г.** Управляемые и численные модели с последствием. Автореферат диссертации ... доктора физико-математических наук. Екатеринбург: Изд-во ИПЦ Издательство УрГУ, 2001. 20 с.
10. **Ревин А. А.** Повышение эффективности, устойчивости и управляемости при торможении автотранспортных средств. Диссертация ... доктора техн. наук Волгоград, 1983. 601 с.
11. **Ревин А. А.** Комплексная технология моделирования тормозной динамики автомобиля. Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2000. 92 с.
12. **Ревин А. А.** Теория эксплуатационных свойств многоосных автомобилей и автопоездов с АБС в режиме торможения: учебное пособие. Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 1997. 95 с.

13. **Ревин А. А.** Теория эксплуатационных свойств автомобилей и автопоездов с АБС в режиме торможения. Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2002. 372 с.
14. **Самарский А. А., Михайлов А. П.** Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М.: Наука, 1997. 316 с.
15. **Самарский А. А., Вабишевич П. Н.** Математическое моделирование и вычислительный эксперимент. URL: <http://www.imamod.ru>.
16. **Учаев Р. С., Борзых С. В., Шиблев Ю. Н.** Математическое моделирование процесса раскрытия солнечных батарей со сложной кинематической схемой раскрытия // Юбилейная XV Междунар. Интернет-конф. по современным проблемам машиноведения. Королев, РКК Энергия им. С. П. Королева. М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2003.
17. **Федин А. П.** Обеспечение адекватности моделирования рабочих процессов элементов автомобиля при испытаниях на виртуально-физических стендах-тренажерах: Диссертация ... канд. техн. наук. Волгоград, 2006. 239 с.
18. **Ходес И. В.** Методология прогнозирования управляемости колесной машины. Диссертация ... доктора техн. наук. Волгоград, 2007. 377 с.

Features of Computer Simulation in Real Time of the Braking Process of Automobile Wheel

E. V. Balakina, balakina@vstu.ru, **N. M. Zotov**, zotovnm@vstu.ru, **A. P. Fedin**, falexey2005@yandex.ru,
Volgograd State Technical University, 400005, Volgograd, Russian Federation

Date received: 22.10.14

The article is dedicated to the mathematical modeling of a movement trajectory of an automobile wheel. The authors discuss a problem of the description of a wheel braking process and calculation of its parameters in real time. They analyze the efficiency of the most widespread numerical methods which are applied for this purpose and considered the conditions, necessary for carrying out of the numerical modeling process of braking of an automobile wheel in real time.

They propose and analyze a new method of the numerical solution of the equations of movement of a wheel in a braking mode.

It is based on adaptation of the system to the integration process. Adaptation is carried out by means of application of a variable step of integration. Integration with small and greater steps is applied for elimination of the instability of calculation. At the initial stage the integration is done by small steps in order to ensure stability of the solution. The further integration is done by greater steps in order to decrease the time for calculation and maintain the stability of the solution.

It was demonstrated, that application of the proposed method allows us to reduce the total time necessary for calculation due to an increase of the integration step without a bigger error risk in the counted parameters.

This method is most effective for calculation of the movement parameters of an automobile wheel, loaded by maximal brake moment, in the braking mode on the road surface of any kind and state.

Keywords: automobile wheel, braking, mathematical modeling, numerical methods, adaptation of system to the integration process, variable step of integration, reduction the calculation time

For citation:

Balakina E. V., Zotov N. M., Fedin A. P. Features of Computer Simulation in Real Time of the Braking Process of Automobile Wheel, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 174—181.

DOI: 10.17587/mau.16.174-182

References

1. **Zarubin V. S.** *Matematicheskoe modelirovanie v tekhnike* (Mathematical modeling in engineering), Moscow, Izdatel'stvo MG TU im. N. E. Bauman, 2010, 496 p. (in Russian).
2. **Zotov V. M., Zotov N. M., Fedin A. P.** Nekotorye zadachi i puti sovershenstvovaniya chislennogo modelirovaniya dinamicheskikh protsessov, *Nazemnye Transportnye Sistemy: Mezhdunarodnyi Sbornik Nauchnykh Trudov*, Volgograd, Izdatel'stvo VolgGTU, 2000, 148 p. (in Russian).
3. **Zotov V. M., Zotov N. M., Fedin A. P.** Problemy chislennogo modelirovaniya dinamicheskikh protsessov v real'nom vremeni i vozmozhnye puti ikh resheniya, part 2, *Matematika. Komp'yuter. Obrazovanie: Sbornik Nauchnykh Trudov*, 2000, iss. 7, pp. 597—603. (in Russian).

4. **Ivanov V. V.** *Kolebaniya avtomobilya s antiblokirovnochnoy sistemoy pri tormozhenii* (Vibration of a car with anti-lock braking system at braking), Doctors thesis, Volgograd, 1986, 172 p. (in Russian).
5. **Kim V. A.** *Metodologiya sozdaniya adaptivnykh SAB ATS na osnove silovogo analiza* (Methodology of creation of adaptive ABS of motor vehicles on the basis of the power analysis), Mogilev, Izdatel'stvo Belorussko-Rossiyskogo universiteta, 2003, 344 p. (in Russian).
6. **Kokorev D. Yu.** *Matematicheskoe modelirovanie i kraevye zadachi*, Samara, Izdatel'stvo SamGTU, 2004, iss. 2, no. 5. (in Russian).
7. **Krantsov G. P.** *Otsenka tormoznykh svoystv avtomobilya s avtomatizirovannym privodom model'nykh metodom* (Evaluation of the braking properties of the vehicle with the automated actuator of the model method), Doctors thesis, Volgograd, 1994, 146 p. (in Russian).
8. **Novosel'tsev V. N.** *Matematicheskoe modelirovanie i teoriya upravleniya (nad stranitsami knigi A. A. Samarskogo i A. P. Mikhaylova "Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery")* (Mathematical modeling and control theory), Moscow, Published by Institute of Control Sciences V. A. Trapeznikov of RAS, available at: http://lgkb.kazan.ru/00_1_1
9. **Pimenov V. G.** *Upravlyaemye i chislennye modeli s posledstviem* (Control and numerical models with delay), Doctors thesis, Ekaterinburg, Izdatel'stvo UrGU, 2001, 20 p. (in Russian).

10. **Revin A. A.** *Povyshenie effektivnosti, ustoychivosti i upravlyaemosti pri tormozhenii avtotransportnykh sredstv* (Efficiency, stability and control during braking of motor vehicles), Doctors thesis, Volgograd, 1983, 601 p. (in Russian).

11. **Revin A. A.** *Kompleksnaya tekhnologiya modelirovaniya tormoznoy dinamiki avtomobilya* (Integrated modeling technology of the braking dynamic of the car), Volgograd, Izdatel'stvo VolgGTU, 2000, 92 p. (in Russian).

12. **Revin A. A.** *Teoriya ekspluatatsionnykh svoystv mnogoosnykh avtomobiley i avtopoezdov s ABS v rezhime tormozheniya: Uchebnoe posobie* (The theory of operational properties of multiaxial cars and trucks with anti-lock braking system in braking mode), Volgograd, Izdatel'stvo VolgGTU, 1997, 95 p. (in Russian).

13. **Revin A. A.** *Teoriya ekspluatatsionnykh svoystv avtomobiley i avtopoezdov s ABS v rezhime tormozheniya* (The theory of operational properties of cars and trucks with anti-lock braking system in braking mode), Volgograd, Izdatel'stvo VolgGTU, 2002, 372 p. (in Russian).

14. **Samarskiy A. A., Mikhaylov A. P.** *Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery* (Mathematical modeling: ideas, methods, examples), Moscow, Nauka, 1997, 316 p. (in Russian).

15. **Samarskiy A. A., Vabishchevich P. N.** *Matematicheskoe modelirovanie i vychislitel'nyy eksperiment*, available at: <http://www.imamod.ru>.

16. **Uchaev R. S., Borzykh S. V., Shchiblev Yu. N.** *Materialy Yubileynoi XV Mezhdunarodnoi Internet—konferencii po sovremennym problemam mashinovedeniya*. Korolev, RKK Energiya im. S. P. Koroleva, Moscow, Izdatel'stvo IMASH RAN, 2003. (in Russian).

17. **Fedin A. P.** *Obespechenie adekvatnosti modelirovaniya rabochikh protsessov elementov avtomobilya pri ispytaniyakh na virtual'no-fizicheskikh standakh-trenazherakh* (The adequacy of the modeling workflow elements of the car at testing on a virtual-physical stands simulators), Doctors thesis, Volgograd, 2006, 239 p.

18. **Khodes I. V.** *Metodologiya prognozirovaniya upravlyaemosti kolesnoy mashiny* (Methodology of forecasting controllability of the wheeled vehicles), Doctors thesis, Volgograd, 2007, 377 p.

Corresponding author:

Balakina Ekaterina V., D. Sc. (Engineering), Professor of Chair "Operation and Maintenance of Automobiles", Volgograd State Technical University, Lenin avenue, 28, 400005, Volgograd, Russian Federation, phone office (8442) 248461, e-mail: balakina@vstu.ru

УДК 681.513.5

О. В. Горячев, д-р техн. наук, проф., зав. каф., info@sau.tsu.tula.ru,

А. Г. Ефромеев, ассистент, age@sau.tsu.tula.ru,

Тульский государственный университет

Алгоритм управления приводом стабилизации и изменения углового положения объекта с вращающимся основанием

Представлена методика синтеза алгоритма управления приводом стабилизации и изменения углового положения объекта, особенностью которого является тот факт, что ротор связан с вращающимся с переменной частотой под действием внешних сил основанием, а угол поворота статора должен быть стабилизирован в заданном положении, при этом максимальная угловая скорость поворота статора строго ограничена.

Ключевые слова: алгоритм управления, бесконтактный двигатель постоянного тока, моментный двигатель, система стабилизации, электропривод

Введение

Исполнительные электрические приводы некоторых систем стабилизации и управления специального назначения, работающие на подвижном основании, устроены таким образом, что ротор исполнительного двигателя вращается за счет действия момента внешних сил, а положением статора необходимо управлять относительно неподвижной системы отсчета. При этом на характер переходного процесса накладывают жесткие требования: отсутствие перегрузки и ограничение на максимальную скорость отработки входных сигналов. Кроме того, предъявляются требования к точности: как правило, ошибка по углу при переменной частоте вращения основания не должна превышать единиц мрад. Вопросам создания систем управления для электрических приводов стабилизации и наведения посвящено большое число научных работ, например [1—4]. Но известные методики проектирования систем управления электроприводов стабилизации и управления не позволяют эффек-

тивно и в полной мере решить задачу разработки алгоритма управления рассматриваемым приводом, у которого скорость вращения ротора исполнительного двигателя под действием внешних сил значительно превышает (практически на два порядка) максимально допустимую скорость поворота объекта управления, связанного со статором исполнительного двигателя. С учетом изменяющейся во времени скорости вращения ротора авторами разработан специальный алгоритм управления приводом на базе квазиоптимального по быстродействию алгоритма с установленным ограничением скорости изменения углового положения объекта.

Построение математической модели исполнительного двигателя

Для синтеза алгоритма управления необходимо сначала получить математическую модель исполнительного двигателя. Воспользуемся исходной моделью бесконтактного двухфазного моментного двигателя в неподвижной системе координат, опи-

санной, например, в трудах И. Е. Овчинникова [5] и С. Г. Герман-Галкина [6]. Учитывая, что ротор двигателя вращается с частотой ω_p , на основе исходной получим модель вида

$$\begin{cases} \frac{di_A}{dt} = \frac{1}{L} (u_A - Ri_A + c_e \omega \sin(Z_p \omega t)); \\ \frac{di_B}{dt} = \frac{1}{L} (u_B - Ri_B - c_e \omega \cos(Z_p \omega t)); \\ M = c_M (\cos(Z_p \omega t) i_B - \sin(Z_p \omega t) i_A); \\ J_{пр} \frac{d\omega}{dt} = M - M_{тр}; \\ \omega = -\omega_p + \omega, \end{cases} \quad (1)$$

где u_A, u_B — напряжения на обмотках двигателя; i_A, i_B — силы тока в обмотках двигателя; L, R — индуктивность и сопротивление обмотки двигателя; c_e — коэффициент противоЭДС; ω — частота вращения статора относительно ротора двигателя; M — формируемый двигателем момент; c_M — коэффициент момента; Z_p — число пар полюсов; $J_{пр}$ — приведенный момент инерции вала двигателя; ω — частота вращения объекта управления (и статора двигателя) в неподвижной системе координат; $M_{тр}$ — момент трения; ω_p — частота вращения ротора в неподвижной системе координат.

Перейдем к модели эквивалентного двигателя постоянного тока вида

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{R}{L} \left(-i + \frac{1}{R} U - \frac{1}{R} c_e \omega \right); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{пр}} (c_M i - M_{тр}); \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega; \\ \omega = -\omega_p + \omega, \end{cases} \quad (2)$$

где R, L, i, U — эквивалентные сопротивление обмотки, индуктивность обмотки, сила тока и напряжение соответственно.

Структурная схема эквивалентной модели двигателя постоянного тока представлена на рис. 1.

Поскольку электромагнитная постоянная времени в данном случае много меньше электромеханической, то производной по току в системе (2) при синтезе алгоритма управления можно пренебречь. Таким образом, от системы уравнений (2) перейдем к системе вида

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dt} = \omega; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{пр}} \left(\frac{c_M}{R} U - \frac{c_e c_M}{R} \omega - M_{тр} \right); \\ \omega = -\omega_p + \omega. \end{cases} \quad (3)$$

Синтез системы управления

Для удобства синтеза алгоритма управления введем переменные состояния $x_1 = \varphi$ и $x_2 = \omega$ и преобразуем систему (3) к следующему виду:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} = -\frac{c_e c_M}{J_{пр} R} x_2 + \left(\frac{c_M}{J_{пр} R} U + \frac{c_e c_M}{J_{пр} R} \omega_p - \frac{M_{тр}}{J_{пр}} \right). \end{cases} \quad (4)$$

Для нахождения фазовой траектории разделим второе уравнение системы (4) на первое:

$$\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{-\lambda_1 x_2 + \Delta}{x_2}. \quad (5)$$

Тогда

$$dx_1 = \frac{x_2}{-\lambda_1 x_2 + \Delta} dx_2,$$

$$\text{где } \lambda_1 = \frac{c_e c_M}{J_{пр} R}; \Delta = \frac{c_M}{J_{пр} R} U + \frac{c_e c_M}{J_{пр} R} \omega_p - \frac{M_{тр}}{J_{пр}}.$$

Проинтегрировав выражение (5), получим следующее уравнение фазовых траекторий:

$$x_1 - x_{10} = \frac{1}{\lambda_1} \left\{ (x_{20} - x_2) - \frac{\Delta}{\lambda_1} \ln \left| \frac{-\lambda_1 x_2 + \Delta}{-\lambda_1 x_{20} + \Delta} \right| \right\},$$

где x_{10}, x_{20} — начальные значения переменных x_1, x_2 .

Общий вид линии переключения показан на рис. 2. В отличие от классической симметричной линии переключения для объекта второго порядка (показана пунктиром на рис. 2) она состоит из трех непрерывных участков, каждый из которых рассмотрим в отдельности.

Участок 1: $x_2 < 0$, скорость вращения статора направлена навстречу скорости вращения, следовательно, $M_{тр}$ — тормозящий момент; противоЭДС двигателя увеличивается на величину $c_e \omega_p$:

$$\Delta_1 = \frac{c_M}{J_{пр} R} u_{\max} + \frac{c_e c_M}{J_{пр} R} \omega_p - \frac{M_{тр}}{J_{пр}}.$$

Уравнение для линии переключения на первом участке:

$$-x_{10} = \frac{1}{\lambda_1} \left\{ x_{20} + \frac{\Delta_1}{\lambda_1} \ln \frac{-\lambda_1 x_{20} + \Delta_1}{\Delta_1} \right\}.$$

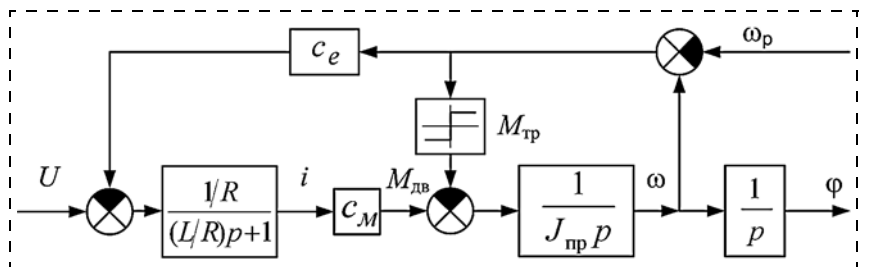


Рис. 1. Структура эквивалентной математической модели двигателя

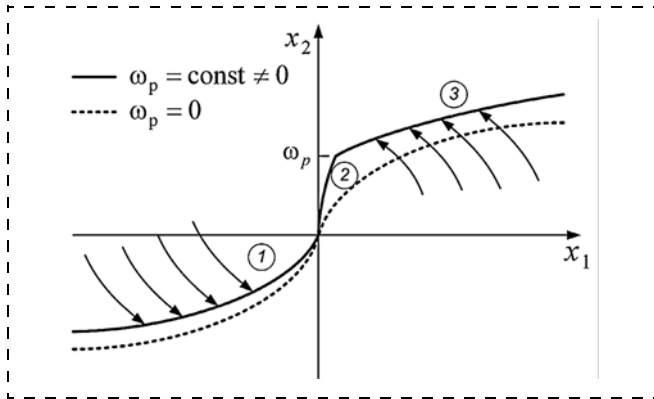


Рис. 2. Общий вид линии переключения

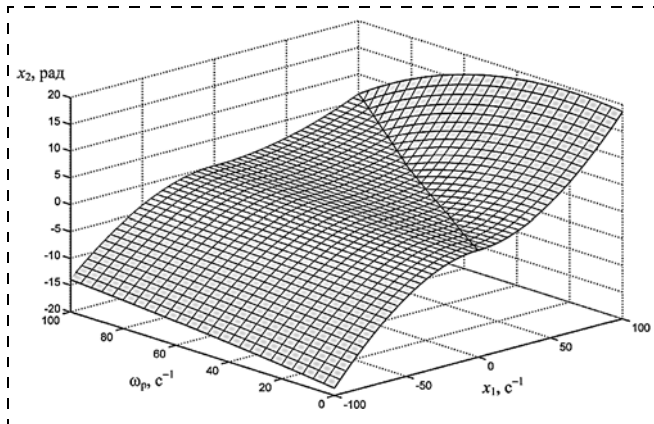


Рис. 3. Поверхность переключения:

x_1 — частота вращения объекта управления, ω_p — частота вращения ротора исполнительного двигателя, x_2 — ошибка отработки угла поворота объекта управления

Переходя к координатам (x_1, x_2) , получаем

$$x_1 = \frac{1}{\lambda_1} \left\{ x_2 + \frac{\Delta_1}{\lambda_1} \ln \frac{-\lambda_1 x_2 + \Delta_1}{\Delta_1} \right\}. \quad (6)$$

Участок 2: $\omega_p > x_2 > 0$, $M_{тр}$ — движущий момент. ПротивоЭДС от вращения статора стремится разогнать двигатель:

$$\Delta_2 = \frac{c_M}{J_{пр} R} (-u_{max}) + \frac{c_e c_M}{J_{пр} R} \omega_p + \frac{M_{тр}}{J_{пр}};$$

$$x_1 = \frac{1}{\lambda_1} \left\{ x_2 + \frac{\Delta_2}{\lambda_1} \ln \frac{-\lambda_1 x_2 + \Delta_2}{\Delta_2} \right\}. \quad (7)$$

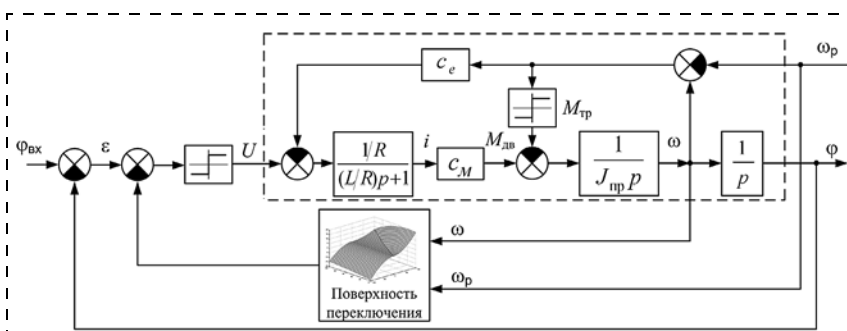


Рис. 4. Структурная схема системы управления

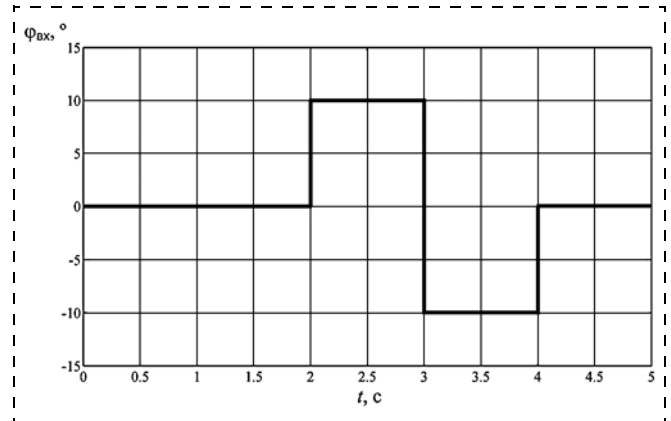


Рис. 5. Заданный угол поворота объекта управления, связанного со статором исполнительного двигателя

Участок 3: $x_2 > \omega_p$, $M_{тр}$ — тормозящий момент,

$$\Delta_3 = \frac{c_M}{J_{пр} R} (-u_{max}) + \frac{c_e c_M}{J_{пр} R} \omega_p - \frac{M_{тр}}{J_{пр}}.$$

Для расчета линии переключения на третьем участке необходимо предварительно найти точку излома:

$$\begin{cases} x_2 = \omega_p = x_{2K}; \\ x_1 = \frac{1}{\lambda_1} \left\{ \omega_p + \frac{\Delta_2}{\lambda_1} \ln \frac{-\lambda_1 \omega_p + \Delta_2}{\Delta_2} \right\} = x_{1K}. \end{cases}$$

Уравнения линии переключения на третьем участке:

$$x_{1K} - x_{10} = \frac{1}{\lambda_1} \left\{ x_{2K} - x_{20} + \frac{\Delta_3}{\lambda_1} \ln \frac{-\lambda_1 x_{20} + \Delta_3}{-\lambda_1 x_{2K} + \Delta_3} \right\};$$

$$x_1 = -x_{1K} + \frac{1}{\lambda_1} \left\{ (x_{2K} - x_2) + \frac{\Delta_3}{\lambda_1} \ln \frac{-\lambda_1 x_2 + \Delta_3}{-\lambda_1 x_{2K} + \Delta_3} \right\}. \quad (8)$$

Таким образом, система уравнений (6), (7) и (8) образует уравнение искомой линии переключения.

Поскольку в реальной системе скорость вращения ротора может изменяться, целесообразно использовать семейство линий переключения, построенных для различных частот вращения ротора, которые вместе образуют поверхность переключения (рис. 3).

Структурная схема разработанной системы управления показана на рис. 4.

Выполним численное моделирование работы системы, реализующей синтезированный алгоритм управления. На вход системы подан сигнал, изображенный на рис. 5, при этом частота вращения ротора изменяется в соответствии с зависимостью, изображенной на рис. 6. Результаты численного моделирования представлены на рис. 7 и 8.

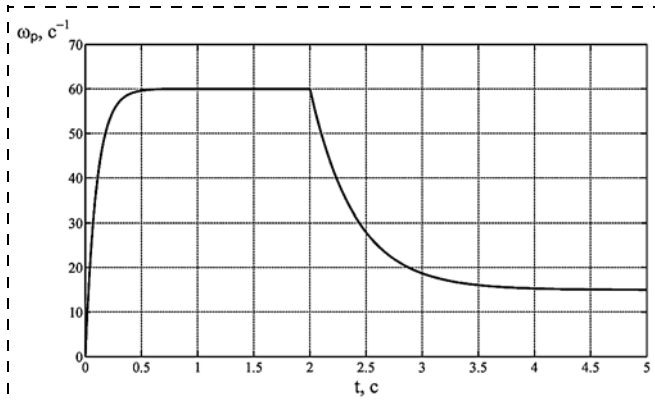


Рис. 6. Частота вращения основания, связанного с ротором исполнительного двигателя

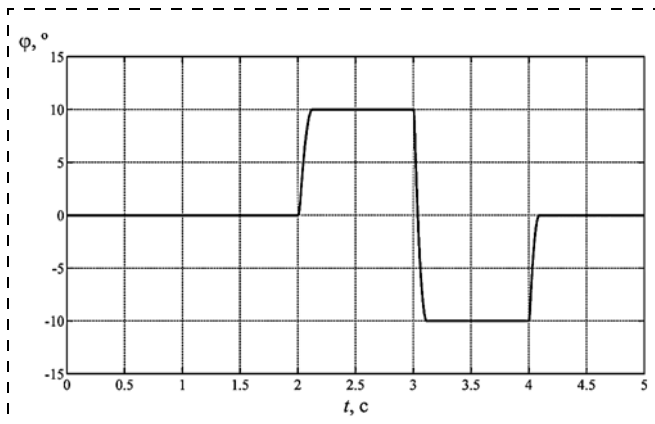


Рис. 7. Угол поворота объекта при управлении без ограничения угловой скорости отработки

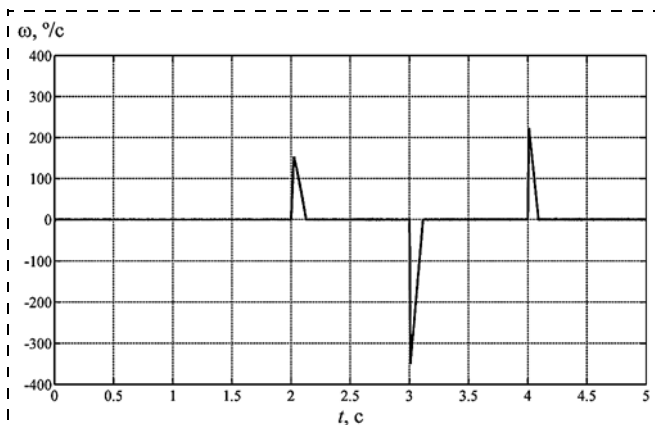


Рис. 8. Угловая скорость объекта управления

Модификация алгоритма с учетом ограничения максимальной скорости регулирования

Для ограничения угловой скорости отработки входного сигнала достаточно ограничить линию переключения по оси x_2 (ω) максимально допустимым значением угловой скорости $\omega_{\max}$, как показано на рис. 9.

Результаты численного моделирования работы системы с теми же входными сигналами, но с ог-

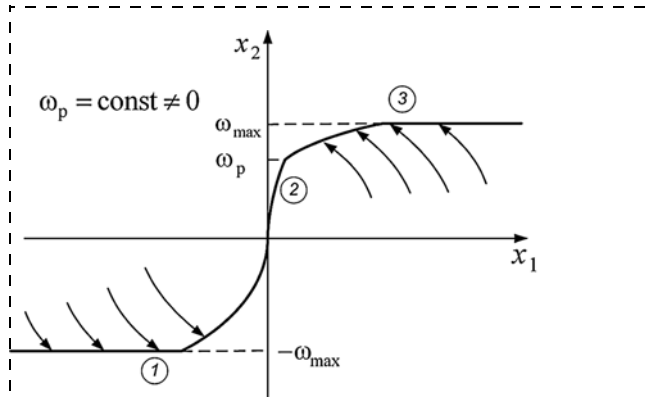


Рис. 9. Общий вид линии переключения с учетом ограничения на максимальную угловую скорость

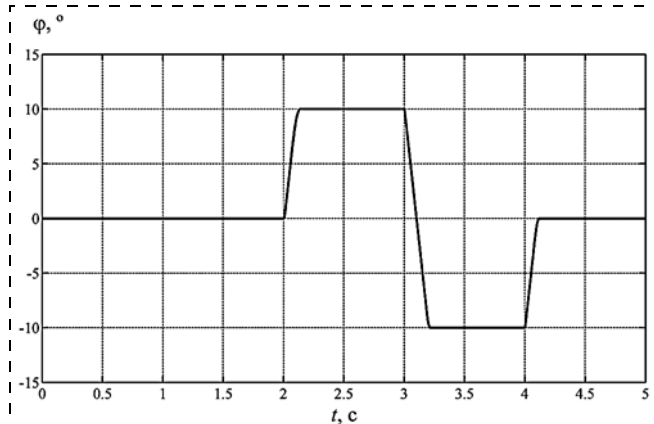


Рис. 10. Угол поворота объекта при управлении с ограничением угловой скорости отработки в 100 °/с

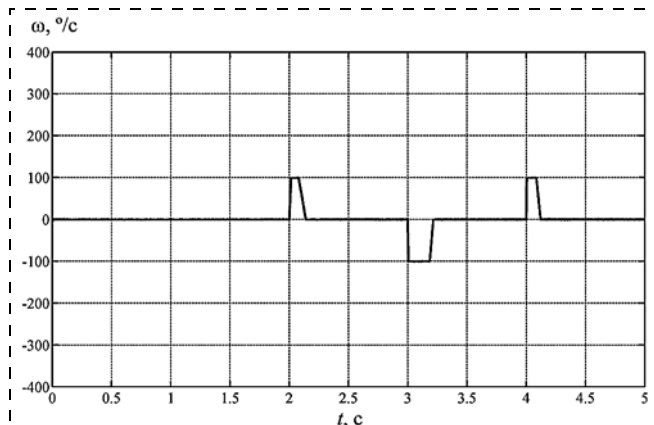


Рис. 11. Угловая скорость объекта управления с учетом заданного ограничения 100 °/с

раничением угловой скорости отработки, представлены на рис. 10 и 11. При этом максимальная угловая скорость была задана равной 100 °/с.

Как видно из графиков на рис. 10 и 11, синтезированная система обеспечивает стабилизацию угла крена в условиях вращения ротора исполнительного двигателя с переменной частотой до 60 Гц и при этом не допускает превышения заданной допустимой угловой скорости поворота объекта управления.

Таким образом, разработан удовлетворяющий заданным требованиям к характеру переходного процесса алгоритм управления приводом стабилизации и изменения угла поворота статора бесконтактного двигателя постоянного тока с независимо вращающимся с переменной частотой ротором. Результаты численного моделирования показали, что представленный в статье алгоритм управления обеспечивает стабилизацию угла поворота объекта с точностью 1 мрад при вращении основания с переменной частотой от 0 до 60 Гц.

Рассмотренная методика синтеза алгоритма управления использована при разработке привода стабилизации для модуля коррекции малогабаритного вращающегося по крену летательного аппарата. Экспериментальные испытания показали работоспособность предложенного алгоритма управления.

1. Горячев О. В. Цифровые электрические следящие приводы постоянного тока систем наведения и стабилизации (математические модели и алгоритмы управления). Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. 190 с.
2. Следящие приводы. В 3 т. Т. 2. Электрические следящие приводы / Ред. Б. К. Чемяданов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 880 с.
3. Терехов В. М. Системы управления электроприводов. М.: Издательский центр "Академия", 2005. 304 с.
4. Электропривод летательных аппаратов: учебник для вузов / В. А. Полковников, Б. И. Петров, Б. Н. Попов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.
5. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность): Курс лекций. СПб.: КОРОНА-Век, 2006.
6. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008.
7. Andre Veltman, Duco W. J. Palle and R. W. de Doncker. Fundamentals of Electrical Drives. Springer, 2007. 345 p.
8. Krishnan R. Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control. Prentice Hall, 2001. 652 p.
9. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5-ти тт. Т. 4: Теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.

Algorithm for Control of the Stabilization Drive of an Object with a Rotating Basis

O. V. Goryachev, info@sau.tsu.tula.ru, A. G. Efremeev, age@sau.tsu.tula.ru,
Tula State University, 300012, Tula, Russia

Date received: 24.09.14

The article describes the technique of synthesis of the algorithm for control of the stabilization drive. The actuating element of the control system is a brushless direct current motor. So, the rotor of the executive motor rotates due to an external torque, and the position of the stator should be controlled. The objectives imposed on the transient process: no position overshoot and the maximum allowed range of the controlled object rotation velocity. A feature of the considered drive is the fact that the rotor of the executive motor rotates with a variable frequency and the rotation angle of the stator should be stabilized in its value. The velocity of the rotation of the drive rotor under an external torque significantly exceeds (almost two orders of the magnitude) the maximum allowed rotation velocity of the controlled object associated with the motor stator. The above requirements to the time-varying rotation velocity are satisfied by the developed control algorithm. The article describes the system of mathematical models of the executive motor, which takes into account its features, the algorithm of the synthesis of quasi-optimal control law and its modification with the maximum speed limit. The article presents the results of the computer simulation of the systems with such control algorithm, which prove the efficiency of the proposed system. The technique is used in the development of the stabilization drive of correction module for the small-size roll rotating aircraft. Experimental tests have shown the efficiency of the developed control algorithm.

Keywords: brushless direct current motor; electric drive; control algorithm; stabilization drive

For citation:

Goryachev O. V., Efremeev A. G. Algorithm for Control of the Stabilization Drive of an Object with a Rotating Basis, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 182–186.

DOI: 10.17587/mau.16.182-186

References

1. Goryachev O. V. *Tsifrovye elektricheskie sledyashchie privody postoyannogo toka sistem navedeniya i stabilizatsii (matematicheskie modeli i algoritmy upravleniya)* (Digital electric DC servo drives for guidance and stabilization systems (mathematical models and control algorithms)), Tula, Izdatel'stvo TulGU, 2009, 190 p. (in Russian).
2. Chemodanov B. K. *Sledyashchie privody. Vol. 2. Elektricheskie sledyashchie privody* (Electric servo drives), Moscow, Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Bauman, 2003, 880 p. (in Russian).
3. Terekhov V. M. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* (Control systems of electric drives), Moscow, Akademiya, 2005, 304 p. (in Russian).
4. Polkovnikov V. A., Petrov B. I., Popov B. N. *Elektroprivod letatel'nykh apparatov: uchebnyk dlya vuzov* (Aircraft electric drives: textbook for high schools), Moscow, Mashinostroyeniye, 1990, 352 p. (in Russian).

5. Ovchinnikov I. E. *Ventil'nye elektricheskie dvigateli i privod na ikh osnove (malaya i srednyaya moshchnost')* (Brushless electric motors and drive (small and medium power)), Sankt-Peterburg, KORONA-Vek, 2006 (in Russian).
6. German-Galkin S. G. *Matlab & Simulink. Proektirovaniye mekhatronnykh sistem na PK* (Matlab & Simulink. The design of mechatronic systems on PC), Saint-Peterburg, KORONA-Vek, 2008 (in Russian).
7. Andre Veltman, Duco W. J. Palle and R. W. de Doncker. *Fundamentals of Electrical Drives*, Springer, 2007. 345 p.
8. Krishnan R. *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*, Prentice Hall, 2001. 652 p.
9. Pupkov K. A., Egupov N. D. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya: Uchebnyk v 5-ti tt. T. 4: Teoriya optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniya* (The methods of classical and modern automatic control theory: Tutorial. Vol. 4: Automatic control systems optimization theory), Moscow, Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Bauman, 2004 (in Russian).

Corresponding author:

Goryachev Oleg V., Head of Department, Doctor of Engineering Science, Professor, Tula State University, Lenin Avenue, 95, 300012, Tula, Russian Federation; phone: +7 (4872) 35-38-35; e-mail: info@sau.tsu.tula.ru

ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



Управление и информатика в авиакосмических и морских системах



Главный редактор:

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСЕЕВ В. В.
БАРАНОВ Л. А.
БЕЛОКОНОВ И. В.
БУКОВ В. Н.
ВАСИЛЬЕВ В. И.
ГОДУНОВ В. А.
ГУРЕВИЧ О. С.
ГУРСКИЙ Б. Г.
ЕФИМОВ В. В.
ЗАЙЦЕВ А. В.
КРЫЖАНОВСКИЙ Г. А.
НЕСТЕРОВ В. А.
ОХТИЛЕВ М. Ю.
ПАНКРАТОВ В. М.
РАСПОПОВ В. Я.
САБО Ю. И.
СТЕПАНОВ О. А.
СОЛДАТКИН В. М.
ФИЛИМОНОВ Н. Б.
ХИМЕНКО В. И.
ЧЕБУРАХИН И. Ф.
ШИРЯЕВ В. И.
ШКОЛИН В. П.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

Левский М. В.

Особенности управления ориентацией космического аппарата, оборудованного инерционными исполнительными органами 188

**Шукалов А. В., Парамонов П. П., Жаринов И. О.,
Жаринов О. О., Костишин М. О.**

Алгоритм и методика автоматизации процедуры оценивания координат цветности элементов изображения бортовых средств индикации в авионике 195

Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю., Коноплин Н. Ю.

Метод синтеза систем автоматической коррекции линейных перемещений подводных аппаратов 204

Дорожко В. М.

Динамическое воздействие "волны-убийцы" на контур морского судна 209

Особенности управления ориентацией космического аппарата, оборудованного инерционными исполнительными органами

Исследуются вопросы корректного задания времени оптимального разворота космического аппарата (КА) из произвольного начального в заданное конечное угловое положение. Рассмотрен случай, когда разворот выполняется с минимальным значением кинетического момента КА. Оптимальное управление находится в классе регулярных движений. Предполагается, что динамика вращения КА во время разворота соответствует известному способу управления [1], включающему максимально быструю раскрутку КА, вращение с постоянным модулем кинетического момента и максимально быстрое гашение кинетического момента. Представлены формализованные уравнения и даны расчетные выражения для определения оптимальной длительности маневра переориентации при известных массоинерционных характеристиках КА, если управление ориентацией осуществляется инерционными исполнительными органами (системой силовых гироскопов, гиродинами). Приводится условие для определения момента начала торможения, использующее текущие параметры движения (по информации об угловом положении КА и измерениям угловой скорости), что значительно повышает точность приведения КА в требуемое положение. Работа является продолжением [1, 2].

Ключевые слова: космический аппарат, ориентация, управление, силовые гироскопы

Введение

В статье решается задача выбора длительности маневра приведения космического аппарата (КА) в положение заданной ориентации (маневра переориентации КА). Под пространственной переориентацией понимают перевод связанных с корпусом КА осей $OXYZ$ из одного известного углового положения в другое известное (обычно заданное) угловое положение за конечное время T . В этом случае параметры разворота (например, компоненты кватерниона разворота) известны заранее, еще до начала маневра; исходные угловые рассогласования могут быть любыми (от нескольких градусов до 180°). При этом угловая ориентация правой системы координат $OXYZ$ (равно как ее начальное $OX_n Y_n Z_n$ и конечное $OX_k Y_k Z_k$ положения) определяется относительно выбранной системы координат (опорного базиса I). В большинстве случаев опорной является инерциальная система координат $OX_i Y_i Z_i$ (ИСК).

В данной работе предполагалось, что для управления ориентацией КА применяются инерционные исполнительные органы — силовые гироскопы [3] (или гиродины), и существенным становится значение кинетического момента корпуса КА, которое необходимо учитывать при управлении вращением КА. Ранее был разработан метод управления переориентацией КА [1], учитывающий ограничение кинетического момента. Его принимаем за модельное (эталонное) движение. Из теоретических проработок [1, 2, 4] известно, что уровень кинетического момента КА и время разворота T взаимозависимы: чем меньше кинетический момент, тем больше длительность маневра [1]. Однако при наличии возмущений, действующих на КА, выбор времени T не столь очевиден (ниже покажем, что определяющую роль при назначении времени T играет располагаемый запас кинетического момента гиросистемы). Нахождению оптимальной длитель-

ности переориентации КА (в рамках способа [1]), при которой запас кинетического момента системы гиродинов был бы максимальным, посвящена данная статья.

1. Уравнения движения и постановка задачи управления

Полагаем, что управление угловым положением КА осуществляется посредством исполнительных механизмов, создающих вращающие моменты относительно всех трех главных центральных осей инерции КА. Угловое движение КА как твердого тела будем описывать кинематическими уравнениями, записанными в кватернионных переменных [5]:

$$2\dot{\Lambda} = \Lambda \circ \omega, \quad (1)$$

где ω — вектор абсолютной угловой скорости КА; Λ — кватернион, отражающий ориентацию КА относительно инерциального базиса I . Уравнение (1) имеет граничные условия $\Lambda(0) = \Lambda_n$ и $\Lambda(T) = \Lambda_k$. Кватернионы Λ_n и Λ_k , задающие ориентацию осей КА в начальный и конечный моменты времени, имеют произвольные наперед заданные значения, удовлетворяющие условию $\|\Lambda_n\| = \|\Lambda_k\| = 1$. Оптимальным считается движение КА, при котором величина

$$\max_{0 < t < T} \sqrt{J_1^2 \omega_1^2 + J_2^2 \omega_2^2 + J_3^2 \omega_3^2} \quad (2)$$

будет минимально возможной (T — момент окончания разворота, J_1, J_2, J_3 — моменты инерции КА). Оптимальное управление пространственным разворотом заключается в переводе КА из положения Λ_n в положение Λ_k в соответствии с уравнением (1) с минимальным значением характеристики (2). Метод управления, представленный в работе [6], решает подобную задачу.

Для КА, управляемых силовыми гироскопами (гиродинами или двигателями-маховиками), ми-

минимизация кинетического момента корпуса КА достаточно актуальна. Силовые гироскопы (гиродины) в настоящее время получили широкое применение в качестве исполнительных органов системы ориентации КА. Их использование в режиме разворота требует, чтобы суммарный кинетический момент гиросистемы не превышал допустимого значения. При управлении ориентацией КА с инерционными исполнительными органами (силовыми гироскопами) вектор кинетического момента гиросистемы должен находиться в заданной ограниченной области S , выход за которую приводит к потере управляемости КА; именно величина кинетического момента определяет управляющие возможности гиросистемы. Управление разворотом КА осуществляется за счет перераспределения кинетического момента между системой гиродина и корпусом КА [3]; общий кинетический момент КА как твердого тела с вращающимися массами оказывается равным или близким к нулю. При разработке, анализе, отработке и моделировании алгоритмов управления ориентацией КА с силовыми гироскопами принимается, что область S располагаемого кинетического момента системы силовых гироскопов ограничена сферой радиуса R_0 . Такое утверждение используется многими разработчиками, конструкторами и исследователями [6–10]; оно справедливо для большого числа (если не большинства) КА. Очевидно, для гарантированного нахождения кинетического момента $\mathbf{G}$ системы силовых гироскопов внутри области S необходимо, чтобы $|\mathbf{G}|$ был как можно меньше. Следовательно, необходимо, чтобы во время управляемого разворота КА из положения Λ_n в положение Λ_k модуль кинетического момента корпуса КА был минимально возможным (так как $\mathbf{L} + \mathbf{G} \approx \mathbf{0}$, где $\mathbf{L}$ — кинетический момент корпуса КА, $\mathbf{G}$ — кинетический момент системы силовых гироскопов). Отсюда становится понятным смысл сформулированной задачи управления с минимизацией показателя (2), поскольку только в этом случае запас кинетического момента гиросистемы, определяемый разностью $R_0 - |\mathbf{L}|$, будет максимальным.

2. Формализация оптимального управления разворотом КА

Выпишем кратко основные соотношения и уравнения, описывающие оптимальное движение КА. Если бы отсутствовали ограничения для момента сил $\mathbf{M}$, то оптимальное по критерию (2) вращение удовлетворяло бы уравнениям [2]

$$\omega_i = bp_i/J_i^2; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{p}_1 &= \omega_3 p_2 - \omega_2 p_3, \quad \dot{p}_2 = \omega_1 p_3 - \omega_3 p_1, \\ \dot{p}_3 &= \omega_2 p_1 - \omega_1 p_2, \end{aligned} \quad (4)$$

где p_1, p_2, p_3 — проекции некоторого вектора $\mathbf{p}$ на связанные с КА оси; $b > 0$ — скалярная величина

(из (4) видно, что вектор $\mathbf{p}$ неподвижен относительно инерциального базиса $\mathbf{I}$); $|\mathbf{p}| = 1$. Задача определения оптимального движения заключается в решении системы уравнений углового движения КА (1) и уравнений (4) при условии, что оптимальная вектор-функция $\omega(t)$ выбрана из требования (3), удовлетворяющего граничным условиям $\Lambda(0) = \Lambda_n$, $\Lambda(T) = \Lambda_k$. Кинетический момент $\mathbf{L}$ и величина b связаны формулой:

$$\mathbf{L}^2 = b^2(p_1^2/J_1^2 + p_2^2/J_2^2 + p_3^2/J_3^2).$$

В случае неограниченных моментов M_i на всем интервале движения $0 < t < T$ КА вращается при $|\mathbf{L}| = \text{const}$; оптимальный разворот КА происходит с постоянным модулем кинетического момента L_m . Конкретное значение L_m однозначно определяется временем окончания разворота T . Оптимальные векторы ω и $\mathbf{p}$ связаны соотношением [2]

$$\omega_i = \frac{L_m p_i}{J_i \sqrt{p_1^2/J_1^2 + p_2^2/J_2^2 + p_3^2/J_3^2}} \quad (i = \overline{1, 3}) \quad (5)$$

при обеспечении краевых условий $\Lambda(0) = \Lambda_n$, $\Lambda(T) = \Lambda_k$ для решения $\Lambda(t)$ уравнения (1), где $L_m > 0$ — модуль кинетического момента, с которым происходит разворот КА. Уравнения для угловых скоростей ω_i могут быть формализованы в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_1 &= \omega_2 \omega_3 (J_2^2 - J_3^2)/J_1^2, \quad \dot{\omega}_2 = \omega_1 \omega_3 (J_3^2 - J_1^2)/J_2^2, \\ \dot{\omega}_3 &= \omega_1 \omega_2 (J_1^2 - J_2^2)/J_3^2. \end{aligned}$$

Решение $\omega(t)$ во время оптимального разворота (без ограничений на M_i) обладает следующими свойствами:

$$\begin{aligned} J_1^2 \omega_1^2 + J_2^2 \omega_2^2 + J_3^2 \omega_3^2 &= R = \text{const}, \\ J_1^4 \omega_1^2 + J_2^4 \omega_2^2 + J_3^4 \omega_3^2 &= D = \text{const}. \end{aligned} \quad (6)$$

Оптимальное управление пространственным разворотом заключается в сообщении КА начальных условий движения (расчетной угловой скорости в начале разворота), поддержании вращения КА с требуемой (программной) угловой скоростью $\omega(t)$, при которой модуль кинетического момента КА имеет постоянное значение $|\mathbf{L}| = \text{const}$, и сбросе имеющейся угловой скорости до нуля в момент времени $t = T$, когда $\Lambda(t) = \Lambda_k$ (при достижении КА конечного положения Λ_k). Ключевая задача — нахождение закона изменения вектора $\mathbf{p}(t)$ и величины L_m , чтобы в результате решения системы уравнений (1), (4), (5) с начальными условиями $\Lambda(0) = \Lambda_n$ граничное условие $\Lambda(T) = \Lambda_k$ на правом конце было выполнено (определение вектора $\mathbf{p}(0)$ — самостоятельная и непростая задача).

Практическое значение имеют задачи, в которых $\omega(0) = \omega(T) = \mathbf{0}$ (такие условия разворота КА

наиболее характерны). Разумеется, в моменты времени $t = 0$ и $t = T$ угловая скорость для номинальной программы вращения КА, определяемая уравнениями (5), не равна нулю. Следовательно, неизбежны переходные участки: разгон — переход из состояния покоя (когда $\omega = 0$) на режим вращения с кинетическим моментом максимальной величины H_0 и торможение — гашение кинетического момента КА до нуля; чтобы завершить разворот в заданное время T , должно выполняться условие $H_0 > L_m$. Между разгоном и торможением выполняются уравнения (4) и

$$\omega_i = \frac{H_0 p_i}{J_i^2 \sqrt{p_1^2/J_1^2 + p_2^2/J_2^2 + p_3^2/J_3^2}} \quad (i = \overline{1, 3}, H_0 = \text{const}). \quad (7)$$

Если условия разворота Λ_n, Λ_k и время T таковы, что времена разгона и торможения пренебрежимо малы (по сравнению с длительностью всего разворота), то сообщение КА необходимого кинетического момента H_0 и гашение имеющегося кинетического момента до нуля можно считать импульсным, и почти на всем развороте (между разгоном и торможением) $|L(t)| = \text{const} = H_0$ с выполнением уравнений (7), (4). Определяющим при нахождении оптимальных решений $p(t), \omega(t)$ является значение вектора p на момент времени $t = 0$.

Если момент управления M ограничен, то сообщение требуемого кинетического момента до уровня $|L| = H_0$ в начале разворота и гашение имеющегося кинетического момента до нуля в конце разворота занимают некоторое конечное (отличное от нуля) время. Интерес представляет общий случай, когда условия разворота Λ_n и Λ_k таковы, что переходными участками (разгоном и торможением) нельзя пренебречь. Пусть вектор M подчиняется условию

$$M_1^2 + M_2^2 + M_3^2 \leq m_0^2. \quad (8)$$

Законы максимально быстрого набора и гашения угловой скорости при ограничении (8) известны [11]. На участке торможения оптимальное управление имеет вид

$$M = -m_0 J \omega / |J \omega|,$$

где $J = \text{diag}(J_1, J_2, J_3)$ — тензор инерции КА. При оптимальном движении кинетический момент КА не меняет своего направления в инерциальной системе координат, а управляющий момент M составляет с кинетическим моментом 180° . Модуль кинетического момента изменяется по закону

$$|L| = L_{oc} - m_0(t - t_0),$$

где $L_{oc} = |J \omega(t_0)|$; t_0 — момент начала остановки вращения.

Оптимальное управление на участке разгона имеет вид

$$M = m_0 J \omega / |J \omega|. \quad (9)$$

Модуль кинетического момента изменяется по закону $|L| = m_0 t$. И при разгоне, и при торможении оптимальным по быстродействию является управление, при котором управляющий момент все время параллелен кинетическому моменту КА.

В момент времени $t = 0$ кинетический момент КА $L = 0$, и для быстреего достижения заданного уровня $|L| = H_0$ необходимо управление (9). Пока $|J \omega(t)| < H_0$, управляющий момент $M = m_0 L / |L|$ будет оптимальным. С момента времени t_p , когда $|J \omega(t_p)| = H_0$, оптимальным будет движение (4), (7), при котором $|J \omega(t)| = H_0$. Из-за наличия граничного условия $\omega(T) = 0$ существует такой момент времени $t_T < T$, начиная с которого выполняют гашение кинетического момента с максимальным моментом управления $M = -m_0 L / |L|$ (момент времени t_T выбирается с таким расчетом, чтобы к моменту полной остановки $\omega = 0$ КА занял требуемое угловое положение Λ_k). На интервалах разгона и торможения предельно максимальным является управляющий момент M , условие (8) переходит в строгое равенство, а на отрезке между разгоном и торможением выполняются уравнения (4), (7) и равенство $|L| = \text{const} = H_0$. В результате траектория вращения КА $\Lambda(t)$ разделяется на три составляющие: $\Lambda(0) - \Lambda(t_p)$, $\Lambda(t_p) - \Lambda(t_T)$ и $\Lambda(t_T) - \Lambda(T)$. Кватернион разворота представим в виде

$$\Lambda_p = \tilde{\Lambda}_n \circ \Lambda_k = \Delta \Lambda_p \circ \Delta \Lambda_{\text{ном}} \circ \Delta \Lambda_T,$$

где $\Delta \Lambda_p = \tilde{\Lambda}_n \circ \Lambda(t_p)$ — кватернион поворота КА за время разгона; $\Delta \Lambda_T = \tilde{\Lambda}(t_T) \circ \Lambda_k$ — кватернион поворота КА за время торможения; $\Delta \Lambda_{\text{ном}} = \Lambda(t_p) \circ \Lambda(t_T)$ — кватернион поворота за время вращения КА с максимальным кинетическим моментом H_0 .

Для нулевых граничных условий $\omega(0) = \omega(T) = 0$ оптимальный по критерию (2) разворот КА включает две фазы, в течение которых модуль момента M максимально возможный, — разгон (увеличение модуля кинетического момента) и торможение (гашение кинетического момента до нуля), и фазу номинального движения, при котором справедливы уравнения (4), (7). На участке разгона векторы M и L имеют одинаковое направление, а на участке торможения векторы M и L имеют противоположные направления; вектор кинетического момента L имеет постоянное направление в инерциальном пространстве, но меняется по величине (на участке разгона он увеличивается с нуля до максимального значения H_0 , а на участке торможения — уменьшается до нуля). Движение КА во время разворота происходит по следующей программе изменения кинетического момента: увеличение модуля вектора L с нуля до H_0 с максимальной скоростью ($|M| = m_0$) при неизменном направлении относительно опорного базиса I ; далее вращение вектора L с постоянной величиной H_0 по оптимальному закону, определяемому уравнениями (4), (7), и, наконец, уменьшение модуля вектора L до нуля с максимальной скоростью ($|M| = m_0$) при неизменном направле-

нии относительно опорного базиса $\mathbf{I}$. Эта программа полностью определяет движение КА в процессе перехода из состояния $\Lambda = \Lambda_n$, $\omega = 0$ в состояние $\Lambda = \Lambda_k$, $\omega = 0$, так как имеют место уравнения (1) и равенство $\omega(t) = J^{-1}\mathbf{L}(t)$.

В силу того, что начальная и конечная угловые скорости равны нулю, а модуль управляющего момента постоянен $|\mathbf{M}| = \text{const} = m_0$, длительность этапов разгона и торможения будет одинакова. Оптимальное решение $\omega(t)$ на участке номинального движения (между разгоном и торможением) обладает свойствами (6), векторы $\mathbf{M}$ и $\mathbf{L}$ ортогональны, модуль кинетического момента максимален и постоянен $|\mathbf{L}| = \text{const} = H_0$. Динамика движения полностью идентична решению задачи оптимального разворота КА, полученному в работе [1]. Если величина H_0 максимально возможного кинетического момента КА известна, то решив задачу максимального быстродействия, получим время разворота T ; если время T окончания разворота задано, то значение параметра H_0 в законе управления подлежит определению.

Проблема заключается в том, что в случае фиксированной длительности разворота T значение H_0 заранее неизвестно. Поэтому оптимальное решение $\mathbf{M}(t)$, $\omega(t)$ получается методом итераций путем многократного решения симметричной задачи разворота КА из положения Λ_n в положение Λ_k за минимальное время (способ такого разворота КА описан в работе [1]), в которой уровень H_0 варьируется таким образом, чтобы конечное время разворота совпало с заданным значением T . Очевидно, чем меньше значение H_0 , тем больше время окончания разворота T , и наоборот. Взяв произвольной величину кинетического момента $|\mathbf{L}| = K_c$ и решая кинематическую задачу разворота (за минимальное время), получим прогнозируемое время $t_{\text{пр}}$ завершения маневра. Тогда за начальное приближение примем величину $H_0^{(0)} = K_c t_{\text{пр}} / T$ (это теоретически минимальное значение, нижняя граница L_m). Первая итерация (первое решение задачи наискорейшего разворота) выполняется со значением параметра H_0 , равным $H_0^{(0)}$. Далее итерационный процесс программируется рекуррентным соотношением. На каждой n -й итерации определяется время разворота T_n из положения Λ_n в положение Λ_k при наличии ограничений $|\mathbf{L}| \leq H_0^{(n)}$ и (8). Каждое последующее приближение $H_0^{(n+1)}$ вычисляем исходя из предыдущей пары $H_0^{(n)}$, T_n , используя рекуррентное правило $H_0^{(n+1)} = T_n H_0^{(n)} / T$. Уточнение параметра H_0 продолжается до тех пор, пока не будет выполнено условие $|T_n - T| < \Delta T$, где ΔT — некоторая (максимально допустимая) ошибка по вре-

мени. В результате все ключевые характеристики оптимальной программы управления (H_0 , $\mathbf{M}(0)$, t_p , t_r) будут определены, а оптимальное движение $\omega(t)$ построено (как результат решения задачи наискорейшего разворота на последней итерации с найденным уровнем $H_0 = H_0^{(opt)}$). Если $5K_c t_{\text{пр}} > m_0 T^2$,

то за начальное приближение $H_0^{(0)}$ можно принять значение $H_0^{(0)} = m_0 T \left(1 - \sqrt{1 - 4K_c t_{\text{пр}} / m_0 T^2} \right) / 2$, которое ближе к искомому уровню $H_0^{(opt)}$, чем L_m .

Оптимальное управление угловым положением КА реализуется по способу, представленному в работе [1]. Так как при торможении КА момент $\mathbf{M}$ направлен строго против кинетического момента $\mathbf{L}$, то момент начала торможения может быть спрогнозирован достаточно точно. Длительность остановки вращения равна $\tau = |\mathbf{L}| / m_0$. Момент начала участка торможения определяется следующим условием:

$$4 \arcsin \frac{K \sqrt{q_2^2 + q_3^2}}{\sqrt{(J_2 \omega_2)^2 + (J_3 \omega_3)^2}} = \frac{K^2 \sqrt{\omega_2^2 + \omega_3^2}}{m_0 \sqrt{(J_2 \omega_2)^2 + (J_3 \omega_3)^2}},$$

где q_j — компоненты кватерниона рассогласования $\tilde{\Lambda}(t) \circ \Lambda_k$ ($j = 0, 1, 2, 3$); $K = |\mathbf{J} \cdot \omega|$ — модуль кинетического момента КА. Гашение кинетического момента на участке торможения выполняется по линейному закону: $|\mathbf{L}(t)| = H_0 - m_0(t - t_r)$, где t_r — момент начала торможения.

Определение момента времени t_r по фактическим (измеренным значениям) кинематическим параметрам движения (угловому рассогласованию и угловой скорости) повышает точность приведения КА в требуемое состояние $\Lambda = \Lambda_k$, $\omega = 0$.

3. Вопросы выбора оптимального времени разворота

Для КА с инерционными исполнительными органами (силовыми гироскопами) важно не только минимизировать кинетический момент во время разворота, но и правильно (максимально корректно) назначить время окончания маневра T . Задача заключается в определении такой длительности разворота T (и значения параметра H_0), чтобы во время движения КА вокруг центра масс эволюция вектора $\mathbf{G}$ суммарного кинетического момента системы гиродинов не привела к выходу его за пределы области S возможных значений ("насыщения" системы гиродинов не наступит) и чтобы не потребовалась "разгрузка", т. е. снятие накопленного кинетического момента системы гиродинов за счет приложения момента сил иной природы (магнитного [12], включением реактивных двигателей ориентации и др.). Такие движения КА считаются допустимыми (в смысле управления ориентацией КА без "разгрузки" системы гиродинов).

Исходными в решении поставленной задачи (выбор оптимального времени разворота) являются два момента:

а) разворот КА происходит в соответствии с методом, приведенным в работе [1], и

б) запас кинетического момента системы гироскопов должен быть максимальным (при найденных параметрах разворота H_0 и T).

Последнее требование позволяет уменьшить вероятность заедывания других (кроме гироскопов) средств управления ориентацией (например, реактивных двигателей). В случае нулевых граничных условий $\omega(0) = \omega(T) = 0$ реализуется только один единственный тип движения: первый участок — разгон КА с максимальным управляющим моментом $|\mathbf{M}| = m_0$ до наступления равенства $|\mathbf{L}| = H_0$, далее участок движения КА с постоянным по модулю кинетическим моментом $|\mathbf{L}| = H_0$ (с выполнением равенств (6)) и затем симметричный участок торможения КА с максимальным управляющим моментом $|\mathbf{M}| = m_0$ до полной остановки КА ($\mathbf{M} \parallel \mathbf{L}$). Изменение модуля кинетического момента $\mathbf{G}$ системы силовых гироскопов во время разворота таково, что на участках разгона и торможения $d|\mathbf{G}|/dt \approx \text{const}$ (так как момент $\mathbf{M}$ управляющих сил намного больше возмущающего момента $\mathbf{M}_B$). Отметим, что в большинстве случаев можно считать $|d|\mathbf{G}|/dt|_{t < t_p} = |d|\mathbf{G}|/dt|_{t < t_t}$, где t_p — момент окончания разгона; t_t — момент начала торможения. В гипотетическом случае, когда $\mathbf{M}_B = 0$, разгон КА можно осуществлять до наступления ситуации $|\mathbf{L}| = R_0$, так как в этом идеальном случае $|\mathbf{L}| = |\mathbf{G}|$ и в интервале между разгоном и торможением $|d|\mathbf{G}|/dt| = 0$ (напомним R_0 — радиус сферы, вписанной в область S возможных значений кинетического момента $\mathbf{G}$ системы силовых гироскопов).

В реальных условиях полета $\mathbf{M}_B \neq 0$ и поэтому $\mathbf{L} + \mathbf{G} \neq 0$, а значит, на участке номинального вращения (когда $|\mathbf{L}(t)| = \text{const}$) в общем случае $|d|\mathbf{G}|/dt| \neq 0$. При наличии возмущающих моментов $\mathbf{M}_B \neq 0$ возникает проблема — каким должно быть время разворота T (или уровень H_0), чтобы до окончания маневра возможное увеличение величины $|\mathbf{G}|$ было меньше $R_0 - H_0$ (зависимость H_0 от T — монотонно убывающая функция). Хотя возмущения $\mathbf{M}_B$ могут "помогать" развороту КА (при этом $d|\mathbf{G}|/dt < 0$), но гарантировать, что такое положение вещей будет продолжаться на всем отрезке времени $[t_p, t_t]$, никак нельзя. Поэтому при расчете проектной программы управления необходимо учитывать наихудший сценарий — считать возмущения $\mathbf{M}_B$ максимально возможными по величине и направленными против кинетического момента $\mathbf{L}$ корпуса КА. Тогда $d|\mathbf{G}|/dt = |\mathbf{M}_B|$ и $\max_{t_p < t < t_t} d|\mathbf{G}|/dt = M_{B \text{ рас}}$, где $M_{B \text{ рас}}$ — максимально возможная величина возмущающего

момента $\mathbf{M}_B$ (т. е. $|\mathbf{M}_B| \leq M_{B \text{ рас}}$). Приращение модуля кинетического момента $\mathbf{G}$ гиросистемы за время вращения КА с $|\mathbf{L}| = \text{const}$ составит

$$\Delta G = \int_{t_p}^{t_t} |\mathbf{M}_B| dt \leq (t_t - t_p) M_{B \text{ рас}} = (T - \tau_p - \tau_t) M_{B \text{ рас}},$$

где τ_p, τ_t — длительности разгона и торможения; $G = |\mathbf{G}|$. Таким образом, должно выполняться соотношение: $G(\tau_p) + (T - \tau_p - \tau_t) M_{B \text{ рас}} \leq R_0$, где R_0 — известная наперед заданная величина.

В момент окончания разгона $G(\tau_p) = |\mathbf{L}(\tau_p)|$ (так как $|\mathbf{M}_B| \ll m_0$). "Насыщение" системы силовых гироскопов может наступить в предельном случае, если выполняется равенство $|\mathbf{L}(\tau_p)| = R_0 - (T - \tau_p - \tau_t) M_{B \text{ рас}}$. Необходимо указать, что чем меньше время разворота T , тем, казалось бы, меньше вероятность достижения к моменту t_t начала торможения порогового значения $|\mathbf{G}(t)| = R_0$. Однако с уменьшением времени T потребный кинетический момент $\mathbf{L}(\tau_p)$ увеличивается, и запас $\Delta R = R_0 - |\mathbf{L}(\tau_p)|$ уменьшается, что, в свою очередь, повышает вероятность наступления "насыщения" гиросистемы (выполнения равенства $|\mathbf{G}| = R_0$). Здесь становится актуальной задача разворота КА с минимальным кинетическим моментом $|\mathbf{L}|$ за отведенное время T (с тем, чтобы максимально увеличить запас кинетического момента $R_0 - |\mathbf{L}|$ для использования его на компенсацию предполагаемых возмущающих моментов $\mathbf{M}_B$).

При построении оптимальной программы управления мы можем варьировать только два параметра — время разворота T или величина кинетического момента КА $|\mathbf{L}(\tau_p)|$ (остальные характеристики заданы по условиям разворота и не могут быть изменены). Запишем уравнение, устанавливающее связь между временем разворота T , оценкой максимальной величины возмущающих моментов $M_{B \text{ рас}}$ и расчетной величиной кинетического момента КА $|\mathbf{L}(\tau_p)|$. Для разворота твердого тела по траектории, удовлетворяющей соотношениям (3)–(4), спра-

ведливо равенство $\int_0^T |\mathbf{L}| dt = \text{const} = S_L$, где величина

S_L определяется исключительно кватернионом разворота $\Lambda_p = \tilde{\Lambda}_n \circ \Lambda_k$ и инерционными характеристиками КА J_1, J_2, J_3 [13]. Обозначив $L_0 = |\mathbf{L}(\tau_p)|$ и полагая, что на участках разгона и торможения модуль кинетического момента меняется по линейному закону $|d|\mathbf{L}|/dt| = m$, где m — максимальная скорость изменения модуля кинетического момента, получим

следующие соотношения: $2 \int_0^T |\mathbf{L}| dt = L_0(2T - \tau_p - \tau_t)$

или $L_0(T - L_0/m) = S_L$ (так как $\tau_p \approx \tau_t = L_0/m$). Возможны две постановки задачи:

а) при наличии ограничения $T \leq T_{\text{зад}}$ используем критерий $L_0 \rightarrow \min$ или $M_{B \text{ рас}}(T - \tau_p - \tau_t) \rightarrow \max$;

б) при свободном правом конце получаем систему двух уравнений, в которых время разворота T определяется из условия $M_{в\text{ рас}} \rightarrow \max$. Выпишем эти уравнения:

$$L_0 + M_{в\text{ рас}}(T - 2L_0/m) = R_0, \quad L_0(T - L_0/m) = S_L$$

и приведем их к каноническому виду

$$L_0(1 - 2M_{в\text{ рас}}/m) + M_{в\text{ рас}}T = R_0, \\ L_0^2/m - L_0T + S_L = 0.$$

Решим указанную систему уравнений, выразив T через L_0 (из первого уравнения системы) и подставив полученное для T выражение во второе уравнение, после чего получим квадратное уравнение относительно переменной L_0 . В результате

$$T = (R_0 - L_0)/M_{в\text{ рас}} + 2L_0/m,$$

откуда

$$L_0^2(1/M_{в\text{ рас}} - 1/m) - L_0R_0/M_{в\text{ рас}} + S_L = 0.$$

Решением последнего уравнения будет

$$L_0 = 0,5(R_0m \pm \sqrt{R_0^2m^2 - 4S_LmM_{в\text{ рас}}(m - M_{в\text{ рас}})})/(m - M_{в\text{ рас}}).$$

При $m \rightarrow \infty$ величины $\tau_p \rightarrow 0$, $\tau_T \rightarrow 0$ и $S_L = L_0T$; поэтому $R_0 - L_0 = M_{в\text{ рас}}T = M_{в\text{ рас}}S_L/L_0$, а значит,

$$L_0 = (R_0 \pm \sqrt{R_0^2 - 4S_LM_{в\text{ рас}}})/2 \quad (\text{очевидно, что } L_0 < R_0).$$

Очевидно, что $m > M_{в\text{ рас}}$, и существуют два решения квадратного уравнения (в обоих $L_0 > 0$) — меньшему значению L_0 соответствует верхняя граница $T(T_{\max})$, большему значению L_0 соответствует нижняя граница $T(T_{\min})$, разворот за минимальное время). Время разворота назначают внутри диапазона $T_{\min} < T < T_{\max}$. За границами интервала $[T_{\min}, T_{\max}]$ разворот без "разгрузки" гиросистемы не гарантируется, так как "насыщение" может наступить либо из-за большого L_0 , сообщаемого при разгоне (оно близко к R_0), вследствие малого времени T , либо из-за большой продолжительности участка номинального вращения (между разгоном и торможением), вследствие чего накопленные за время разворота возмущения "съедают" весь запас $R_0 - L_0$ кинетического момента гиросистемы. Если величина $M_{в\text{ рас}}$ не известна или может меняться в широких пределах, то время разворота T необходимо назначить на основании условия максимальной параметра $M_{в\text{ рас}}$, при котором выполняется неравенство $R_0^2m > 4S_LM_{в\text{ рас}}(m - M_{в\text{ рас}})$. Функция $S_LM_{в\text{ рас}}(m - M_{в\text{ рас}})$ максимальна в точке $M_{в\text{ рас}} = m/2$; однако таких возмущающих моментов, сравнимых по величине с моментом управляющих сил, не бывает. Следовательно, можно счи-

тать, что с возрастанием параметра $M_{в\text{ рас}}$ корни квадратного уравнения, в котором L_0 — единственная неизвестная величина, приближаются друг к другу, а диапазон $[T_{\min}, T_{\max}]$ допустимых значений времени разворота T сужается. Найдем то критическое значение параметра $M_{в\text{ рас}}$ (обозначим его $M_{кр}$), при котором разворот из положения Λ_H в положение Λ_K еще возможен без нарушения требования $|\mathbf{G}| \leq R_0$. Для этого надо решить уравнение $R_0^2m - 4S_LM_{в\text{ рас}}(m - M_{в\text{ рас}}) = 0$ относительно $M_{в\text{ рас}}$ (все остальные величины в этом уравнении известны, они заданы по условиям задачи оптимального разворота). В итоге $M_{кр} = (m - \sqrt{m^2 - R_0^2m/S_L})/2$ (из физического смысла следует $M_{в\text{ рас}} < m/2$, и поэтому нас интересует единственный корень $M_{в\text{ рас}} = M_{кр}$); $\max|\mathbf{M}_B| < M_{в\text{ рас}}$ (т. е. $M_{в\text{ рас}} \leq M_{в\text{ рас}}$). С учетом действия возмущений $\mathbf{M}_B$ априорно неизвестной величины оптимальными значениями будут

$$L_0 = R_0/(1 + \sqrt{1 - R_0^2/S_Lm}) \quad \text{и} \quad T = T_{\text{opt}} = 2S_L/R_0.$$

Пришли к тому, что $T_{\text{opt}} = 2T_{\text{fast}}$, где T_{fast} — теоретически достижимая нижняя граница времени разворота КА при наличии ограничения $|\mathbf{J}\omega| \leq R_0$ (в этих формулах $S_L = K_{\text{сгп}}t_{\text{пр}}$).

Как и следовало ожидать, в оптимальном случае время разворота должно быть в два раза больше времени идеального разворота (когда модуль кинетического момента КА $\mathbf{L}$ равен максимально допустимому значению R_0 и возмущающие моменты отсутствуют).

Заключение

Известно, что оптимальным при управлении инерционными исполнительными органами является способ ориентации [1]. В общем случае маневр разворота разделяется на три характерные фазы: разгон КА (сообщение угловой скорости) до заданного значения кинетического момента, вращение КА с постоянным модулем кинетического момента и гашение угловой скорости до нуля. Задача управления ориентацией сводится к решению трех задач — наискорейшему сообщению КА требуемого кинетического момента, вращению КА с расчетной скоростью движения и максимально быстрому торможению (успокоению) КА. На участках разгона и торможения управляющий момент максимально возможный и параллелен вектору кинетического момента, что обеспечивает минимальное время достижения заданного значения кинетического момента КА (или гашения имеющегося кинетического момента до нуля). В интервале между разгоном и торможением КА вращается с постоянным по модулю кинетическим моментом (ограничение на момент управления $\mathbf{M}$ является несущественным,

оно выполняется); управляющий момент формируется из условия, чтобы движение КА вокруг центра масс происходило строго по назначенной траектории вращения, определяемой расчетным вектором разворота и заданным значением модуля кинетического момента. На этапах интенсивного набора и гашения кинетического момента модуль управляющего момента остается постоянным. Это обстоятельство позволяет использовать описанный способ управления разворотом КА в случае, когда управляющий момент ограничен сферой.

Эффективность использования инерционных устройств (силовых гироскопов) в режиме пространственного разворота определяется не только принятым алгоритмом управления ориентацией КА, но и временем завершения маневра переориентации. Фактор длительности переориентации во многих случаях может оказаться решающим. Ставилась задача — определить такую длительность разворота, чтобы в процессе движения КА вокруг центра масс вектор суммарного кинетического момента системы гиродинов находился внутри области возможных значений, что исключит необходимость "разгрузки" гиросистемы и обеспечит завершение разворота без привлечения других средств управления ориентацией (например, реактивных двигателей). Решение указанной задачи позволяет совершать пространственные развороты КА, используя только силовые гироскопы. В статье приводятся оценки для нахождения оптимального времени разворота в зависимости от конкретных условий — начального и конечного положений КА и его инерционных характеристик.

1. Левский М. В. Некоторые вопросы оптимального по времени управления программным разворотом космического аппарата // Космические исследования. 2011. Т. 49. Вып. 6.
2. Левский М. В. Об одном случае оптимального управления пространственной ориентацией космического аппарата // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 4.
3. Раушенбах Б. В., Токарь Е. Н. Управление ориентацией космических аппаратов. М.: Наука, 1974.
4. Левский М. В. Решение задачи оптимального управления разворотом КА в рамках класса регулярных движений // Космонавтика и ракетостроение. 1999. № 16.
5. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, 1973.
6. Левский М. В. Способ управления разворотом космического аппарата. Патент на изобретение РФ № 2093433 // Бюллетень "Изобретения. Заявки и патенты". 1997. № 29.
7. Каструччио И. Цифровая система стабилизации орбитальной космической станции "Скайлэб" // Вопросы ракетной техники. 1973. № 10.
8. Сарычев В. А., Беляев М. Ю., Зыков С. Г., Сазонов В. В., Тесленко В. П. Математические модели процессов поддержания ориентации орбитальной станции "Мир" с помощью гиродинов. М.: Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша АН СССР. 1989. № 10.
9. Ковтун В. С., Митрикас В. В., Платонов В. Н., Ревнивых С. Г., Суханов Н. А. Математическое обеспечение проведения экспериментов при управлении ориентацией космического астрофизического модуля "Гамма" // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1990. № 3.
10. Сарычев В. А., Беляев М. Ю., Зыков С. Г., Зуева Е. Ю., Сазонов В. В., Сайгираев Х. У. О некоторых задачах управления ориентацией орбитального комплекса "Мир — Квант-1 — Квант-2" // Тр. XXV чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского. Секция "Проблемы ракетной и космической техники". М.: ИИЕТ им. С. И. Вавилова РАН, 1991.
11. Левский М. В. К вопросу оптимального успокоения вращения космического аппарата // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. № 1.
12. Алексеев К. Б., Бебенин Г. Г. Управление космическими летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1974.
13. Левский М. В. Управление пространственным разворотом космического аппарата с минимальным значением функционала пути // Космические исследования. 2007. Т. 45, Вып. 3.

Features of Attitude Control of a Spacecraft, Equipped with Inertial Actuators

M. V. Levskii, dp940@mail.ru, Maximov Research Institute of Space Systems as Branch of the Khrunichev State Research and Production Space Center, Yubileiny, The Moscow region

Date received: 10.07.14

The topic of the article is the problem of the correct selection of time for an optimal spacecraft turn from any initial position to the prescribed final angular position. The case, when a spacecraft is rotated with a minimal magnitude of the angular momentum, is considered. The optimal control is within the class of the regular motions. It is assumed that the dynamics of the spacecraft rotation during a turn corresponds to the well-known control method [1], which includes a maximal possible acceleration of rotation of a spacecraft, rotation with constant module of angular momentum and the maximal possible slowing down of the angular momentum. At the acceleration and braking phases the control moment is the greatest possible and is parallel to the spacecraft angular momentum; between the acceleration and braking phases the controlling moment is formed from the condition that spacecraft motion occurred strictly along the appointed trajectory of rotation defined by computational turn vector and a preset value of the modulus of the angular momentum. Formalized equations are presented, and computational expressions for definition of the optimal duration of reorientation maneuver are derived for the known mass-inertial characteristics of a spacecraft, if the attitude control is implemented with the use of the inertial actuators (system of powered gyroscopes, gyrodynes). The condition for determination of the moment of the beginning of the braking, which uses the current parameters of motion (information on the angular position of a spacecraft and measurements of the angular velocity) is presented, which increases considerably the accuracy of spacecraft movement to the required position. This paper is continuation of [1, 2].

Keywords: spacecraft, attitude, control, powered gyroscopes

For citation:

Levskii M. V. Features of Attitude Control of a Spacecraft, Equipped with Inertial Actuators, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 188–195.

DOI: 10.17587/mau.16.188-195

References

1. **Levskii M. V.** *Kosmicheskie Issledovaniya*, 2011, vol. 49, iss. 6 (in Russian).
2. **Levskii M. V.** *Izvestiya RAN. Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 2012, no. 4 (in Russian).
3. **Raushenbakh B. V., Tokar' E. N.** *Upravlenie orientatsiei kosmicheskikh apparatov* (Control of the orientation of spacecraft), Moscow, Nauka, 1974 (in Russian).
4. **Levskii M. V.** *Kosmonavtika i Raketostroenie*, 1999, no. 16 (in Russian).
5. **Branets V. N., Shmyglevskii I. P.** *Primenenie kvaternionov v zadachakh orientatsii tverdogo tela* (The use of quaternions in problems of orientation of a rigid body), Moscow, Nauka, 1973 (in Russian).
6. **Levskii M. V.** *Byulleten' "Izobreteniya. Zayavki i Patenty"*, 1997, no. 29 (in Russian).
7. **Kastruchchio I.** *Voprosy Raketnoi Tekhniki*, 1973, no. 10 (in Russian).

8. **Sarychev V. A., Belyaev M. Yu., Zykov S. G., Sazonov V. V., Teslenko V. P.** *Preprint IPM im. M. V. Keldysha AN SSSR*, 1989, no. 10 (in Russian).

9. **Kovtun V. S., Mitrikas V. V., Platonov V. N., Revnivykh S. G., Sukhanov N. A.** *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya Kibernetika*, 1990, no. 3 (in Russian).

10. **Sarychev V. A., Belyaev M. Yu., Zykov S. G., Zueva E. Yu., Sazonov V. V., Saigirayev Kh. U.** *Trudy XXV chtenii, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idei K. E. Tsiolkovskogo. Sektsiya "Problemy raketnoi i kosmicheskoi tekhniki"*, Moscow, 1991 (in Russian).

11. **Levskii M. V.** *Izvestiya RAN. Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 2011, no. 1 (in Russian).

12. **Alekseev K. B., Bebenin G. G.** *Upravlenie kosmicheskimi letatel'nyimi apparatami* (The space vehicles control), Moscow, Mashinostroenie, 1974 (in Russian).

13. **Levskii M. V.** *Kosmicheskie Issledovaniya*, 2007, vol. 45, iss. 3 (in Russian).

Corresponding author:

Levskii Mikhail V., Leading Researcher, Maximov Research Institute of Space Systems as Branch of the Khrunichev State Research and Production Space Center, Yubileiny, Moscow oblast, e-mail: dp940@mail.ru

УДК 629.73.02; 629.73.05/.06; 535.643

А. В. Шукалов, ген. директор, **П. П. Парамонов**, д-р техн. наук, проф., советник ген. директора, **И. О. Жаринов**, д-р техн. наук, доц., руководитель учебно-научного центра, igor_rabota@pisem.net, ФГУП "Санкт-Петербургское ОКБ "Электроавтоматика" имени П. А. Ефимова",

О. О. Жаринов, канд. техн. наук, доц.,

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

М. О. Костишин, аспирант,

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (НИУ ИТМО)

Алгоритм и методика автоматизации процедуры оценивания координат цветности элементов изображения бортовых средств индикации в авионике

Рассматривается задача исследования бортовых средств отображения информации в целях определения автоматизированным способом координат цветности элементов изображения, обладающих повышенными характеристиками восприятия для человека в условиях воздействия внешней освещенности. Рассматриваются различные системы кодирования цвета, применяемые в бортовых индикаторах, выполненных на базе жидкокристаллической панели. Предлагается схема автоматизированного рабочего места для проведения исследования, приводятся описания и назначение компонентов системы автоматизации проектирования, установленной в составе рабочего места. Обсуждаются результаты экспериментов по измерению яркости и оценке яркостного контраста изображений в различных цветах. Предлагается алгоритм автоматизированного поиска глобального максимума двумерной поверхности распределения контраста изображения на плоскости координат цветности. Результатами исследования являются методика и алгоритм поиска координат цветности с максимальным значением яркостного контраста, а также сами координаты цветности в точке максимума контраста.

Ключевые слова: индикация, авионика, яркостный контраст, системы кодирования цвета, преобразование Грассмана, задача оптимизации

Введение

В процессе проектирования бортовых средств отображения пилотажно-навигационной информации и геоинформационных данных разработчики бортового авиационного оборудования сталкиваются с задачей выбора желаемых значений координат цветности индицируемых элементов изображения. По сложившейся в авиационной промышленности практике соответствие вида параметра и наименования цвета, которым отображается этот

параметр, определено в действующей нормативно-технической документации (НТД).

Так, например, согласно отечественному руководству 25-11А по сертификации систем электронной индикации самолетов транспортной категории индикация:

- указателя угла крена должна осуществляться белым цветом;
- указателя заданного путевого угла ортодромии — голубым цветом;
- шкалы крутящих моментов — салатовым цветом;

- индекса скорости поднятия стойки шасси — коричневым цветом;
- указателя азимута радиомаяка — желтым цветом и т. д.

Руководство 25-11 А, таким образом, определяет общепринятые в международной практике создания авиационных объектов наименования цветов для индикации каждого вида информации или параметра, но не определяет значения (x, y) -координат цветности для каждого наименования цвета. Координаты цветности на XY -плоскости связаны со значениями кодов RGB (Red, Green, Blue) цветов, используемых разработчиками при подготовке палитры функционального программного обеспечения. Индикация элементов изображения осуществляется на борту летательного аппарата (ЛА) на жидкокристаллическом (ЖК) экране многофункциональных цветных индикаторов (МФЦИ).

Из практики применения МФЦИ известно [1–3], что восприятие пилотом значений параметров, индицируемых на ЖК экране, затрудняется при наличии прямой солнечной засветки, создающей в плоскости экрана уровень внешней освещенности до 75 клк. Внешняя освещенность существенно снижает значение яркостного контраста индицируемого изображения за счет перераспределения отношения яркости цветного изображения и яркости фона. В связи с этим требуются специальные проектные решения для определения компонентов цветов и оттенков, устойчивых к восприятию человеком в условиях воздействия на средство индикации повышенной внешней освещенности.

Таким образом, решение задачи выбора желаемых значений координат цветности элементов изображения авионики должно быть основано на:

- выполнении существующих авиационных требований НТД;
- введении критерия качества процедуры выбора (контраста индицируемого изображения во всех используемых в палитре МФЦИ цветах);
- выполнении процедуры оптимизации выбора по заданному критерию, осуществляемой в целях определения экстремума (максимума) критерия качества на основе математических методов поиска оптимальных проектных решений.

1. Принцип формирования изображения в бортовых системах индикации

Изображение на экране МФЦИ формируется путем отображения в различных цветах всех пикселей ЖК экрана. Совокупности пикселей, структурированные определенным образом, образуют знаки, мнемосимволы, линии, секторы, дуги, окружности с заливкой и без и т. д., индицируемые на экране МФЦИ. Цвет отображаемых пикселей определяется углами поворота кристаллов в красном (R — Red), зеленом (G — Green) и синем (B — Blue) компонентах цвета, поляризирующих задний или боковой подсвет белого спектра свечения, создаваемый лампами подсвета ЖК панели.

Число отображаемых на МФЦИ оттенков каждого цвета определяется разрядностью данных ЖК панели и особенностями построения тракта видеоОЗУ графического контроллера [4–7] МФЦИ. Так, для ЖК панели с 6-битным форматом данных по компонентам RGB возможно отображение 2^6 оттенков для каждого из основных цветов:

- красного цвета (двоичный позиционный код управления углом поворота кристалла каждого пикселя $R_0...R_5 = \{000000\}, \{000001\}, ..., \{111111\}$);
- зеленого цвета (двоичный позиционный код управления углом поворота кристалла каждого пикселя $G_0...G_5 = \{000000\}, \{000001\}, ..., \{111111\}$);
- синего цвета (двоичный позиционный код управления углом поворота кристалла каждого пикселя $B_0...B_5 = \{000000\}, \{000001\}, ..., \{111111\}$), и их 2^{18} комбинаций, образующих полную цветовую палитру ЖК матрицы. Аналогично для 8-битного формата данных ЖК панели $\{R_0...R_7, G_0...G_7, B_0...B_7\}$ число отображаемых на экране МФЦИ цветов и оттенков составит 2^{24} , что повышает номенклатуру воспроизводимых на борту ЛА цветовых оттенков.

Функциональная схема тракта формирования изображения в графическом контроллере (модуле графическом) МФЦИ приведена на рис. 1.

Канал формирования изображения состоит из трех банков видеоОЗУ; элементов программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС); ПЗУ знаков и цветов, программируемого пользователем извне; шинного формирователя (ШФ), необходимого для поддержки межмодульного интерфейса графического контроллера; ПЗУ загрузки ПЛИС и передатчика интерфейса LVDS (Low Voltage Digital Signal) — интерфейса ЖК панели.

Соответствие каждого цвета, заданного кодом RGB в видеоОЗУ графического контроллера, координатам цветности воспроизводимого цвета основано на преобразованиях (прямом и обратном) Грассмана, связывающих код цвета (рис. 2, а, см. третью сторону обложки) в компонентах $R, G, B \in [0, 255]$

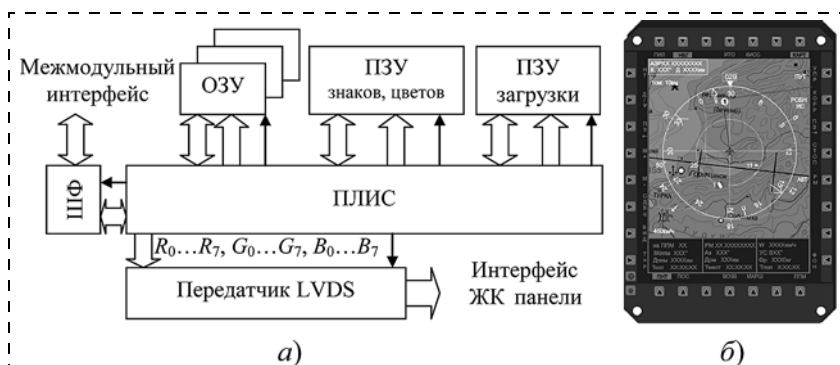


Рис. 1. Функциональная схема тракта формирования изображения в МФЦИ (а) и пример индикационного кадра на МФЦИ (б)

в десятичной системе счисления со значениями сторон $X, Y, Z \in [0, 1]$ цветового треугольника Максвелла (рис. 2, б, см. третью сторону обложки). Уравнения прямого $RGB \rightarrow XYZ$ и обратного $XYZ \rightarrow RGB$ преобразования имеют, соответственно, вид [8–11]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где X, Y, Z — компоненты цвета в системе XYZ ; $X_r, X_g, X_b, Y_r, Y_g, Y_b, Z_r, Z_g, Z_b$ — компоненты цвета, определенные Международной комиссией по освещению (МКО) и используемые в качестве эталона для точного стандарта определения цвета; R, G, B — код цвета (в десятичной системе счисления) компонентов основных цветов (красный, зеленый, синий) в системе RGB . Компоненты X_r, Y_r, Z_r определяют правило преобразования для эталонного значения красного цвета, компоненты X_g, Y_g, Z_g и X_b, Y_b, Z_b — для зеленого и синего цветов соответственно.

Переход от значений сторон X, Y, Z треугольника Максвелла к (x, y) -координатам цветности (рис. 2, в, см. третью сторону обложки) элементов изображения осуществляется по формулам

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}, \quad (2)$$

координата z при таком преобразовании может не рассчитываться.

2. Автоматизированное рабочее место оператора МФЦИ

Подготовка палитры функционального программного обеспечения (ФПО) выполняется на инструментальной ЭВМ (ИЭВМ) в системе автоматизированного проектирования (САПР) автоматизированного рабочего места (АРМ) [12–15] оператора МФЦИ. АРМ устанавливается на предприятии-разработчике МФЦИ и может использоваться на сторонних предприятиях, специализирующихся на проведении испытаний и на сертификации авиационных систем индикации, входящих в состав информационно-управляющего поля кабины летательного аппарата.

САПР АРМ МФЦИ составляют (рис. 3):

1. *Программное обеспечение (ПО) САПР*, включающее компоненты данных, компоненты ФПО и тестового программного обеспечения (ТПО), компоненты прикладного ПО для загрузки данных и программ в МФЦИ. Компонентами ПО являются доку-

менты с текстами программ и кодами данных. Компонентами данных являются:

- палитра (таблица десятичных кодов RGB цветов, используемых разработчиками ПО при создании индикационных кадров авионики, включающих отображение пилотажно-навигационных параметров и геоинформационных данных);
- библиотека шрифтов и символов согласованной конфигурации, представленных в памяти графического контроллера МФЦИ в векторном и растровом виде для различных по размеру (в пикселях) знакомест (библиотека включает изображения букв и символов согласованной конфигурации различных языков (русских букв, латиницы и др.), цифры в римском и арабском алфавите и т. д.);
- библиотека внутренних углов (приращений, рассчитанных по тригонометрическим функциям для построения на экране МФЦИ графических примитивов типа "дуга" и "окружность" с использованием аппроксимации вписанным многоугольником).

ПО САПР позволяет оператору решать автоматизированным способом следующие задачи:

- создавать и редактировать на ИЭВМ файлы загрузочных компонентов данных, используемых при отображении индикационных кадров МФЦИ;
- заносить из ИЭВМ в память графического контроллера МФЦИ по технологическому интерфейсу загрузочные компоненты данных;
- заносить из ИЭВМ в память вычислительного модуля МФЦИ компоненты ФПО и ТПО для оценки работоспособности изделия во всех режимах работы.

2. *Математическое обеспечение САПР*, включающее совокупность математических методов и критериев качества, математических моделей и алгоритмов автоматизации проектирования, необходимых для выполнения процедуры оптимизации

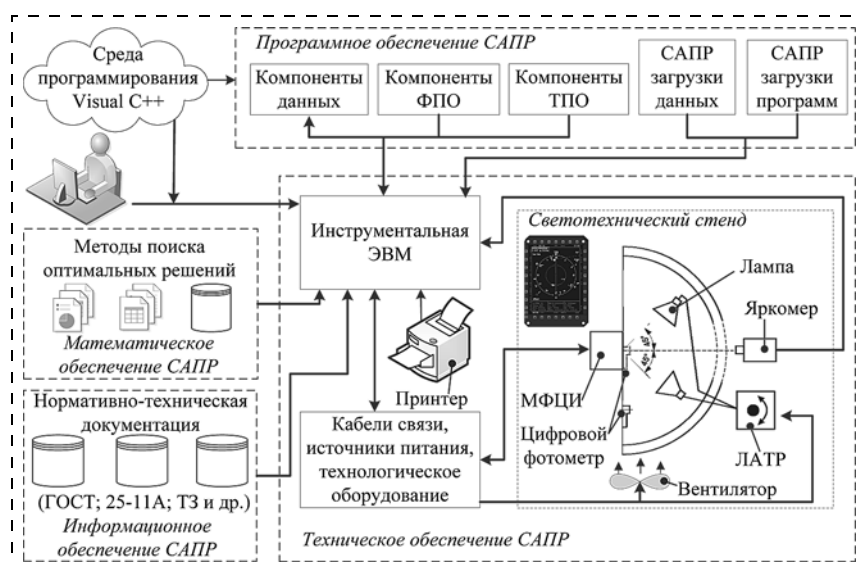


Рис. 3. Компоненты САПР автоматизированного рабочего места МФЦИ

процесса выбора оператором цветовой палитры МФЦИ. Математическое обеспечение САПР позволяет оператору решать следующие задачи:

- осуществлять выбор методов и критериев, приемлемых для выполнения процедуры оптимизации выбора цветовой палитры;
- проводить математический анализ данных, полученных в результате измерения яркости и оценки яркостного контраста изображения, в целях поиска компонентов цветов и оттенков, обладающих повышенными характеристиками восприятия для человека.

3. Информационное обеспечение САПР, включающее совокупность сведений, необходимых для выполнения процедур автоматизированного выбора. Основой информационного обеспечения САПР являются автоматизированные банки данных, которые состоят из различных баз данных САПР и систем управления базами данных. В информационное обеспечение САПР автоматизированного рабочего места МФЦИ входят:

- НТД (в частности, руководство 25-11А), государственные и отраслевые стандарты на средства отображения информации индивидуального и коллективного использования, стандарты на оформление документации, техническое задание (ТЗ) на разработку МФЦИ;
- существующие (полученные ранее другими разработчиками) типовые проектные решения МФЦИ

с указанием значимых для процедуры выбора параметров изделий;

- существующие системы кодирования изображений (математические зависимости, связывающие коды, координаты цветности и длины волн цветов и оттенков) [8—11].

Информационное обеспечение САПР позволяет оператору решать следующие задачи:

- осуществлять выбор актуального для авионики подмножества цветов и оттенков, используемых при отображении пилотажно-навигационных параметров и геоинформационных данных, из полного множества цветов и оттенков (2^{18} для 6-битного ЖК экрана или 2^{24} для 8-битного ЖК экрана), потенциально воспроизводимых на МФЦИ;
- осуществлять выбор системы кодирования изображения, в которой будет выполняться процедура выбора желаемых значений координат цветности;
- осуществлять выбор системы кодирования изображения, в которой будет выполняться проектирование физического устройства — графического контроллера МФЦИ;
- осуществлять выбор системы кодирования изображения, в которой будет выполняться программирование физического устройства.

4. Техническое обеспечение САПР, включающее совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств, предназначенных для

выполнения процедуры оптимизации выбора цветовой палитры МФЦИ. Техническое обеспечение САПР МФЦИ позволяет оператору решать автоматизированным способом следующие задачи:

- подготовка компонентов данных, компонентов ФПО и ТПО. Техническое обеспечение САПР МФЦИ, предназначенное для решения этой задачи, составляет ИЭВМ. ИЭВМ с установленным ПО позволяет оператору осуществлять программным способом процедуры автоматизации подготовки и редактирования компонентов данных и компонентов программ перед их вводом в МФЦИ. ИЭВМ предоставляет оператору возможность кодирования загружаемых компонентов, сохранения данных и программ на жестком диске ИЭВМ и редактирования созданных ранее данных;
- передача данных. Группу технического обеспечения САПР, предназначенного для решения этой задачи, составляют: ИЭВМ, кабели связи и источники питания. Группа предоставляет оператору возможность ввода данных в МФЦИ, визуального и аппаратурного кон-

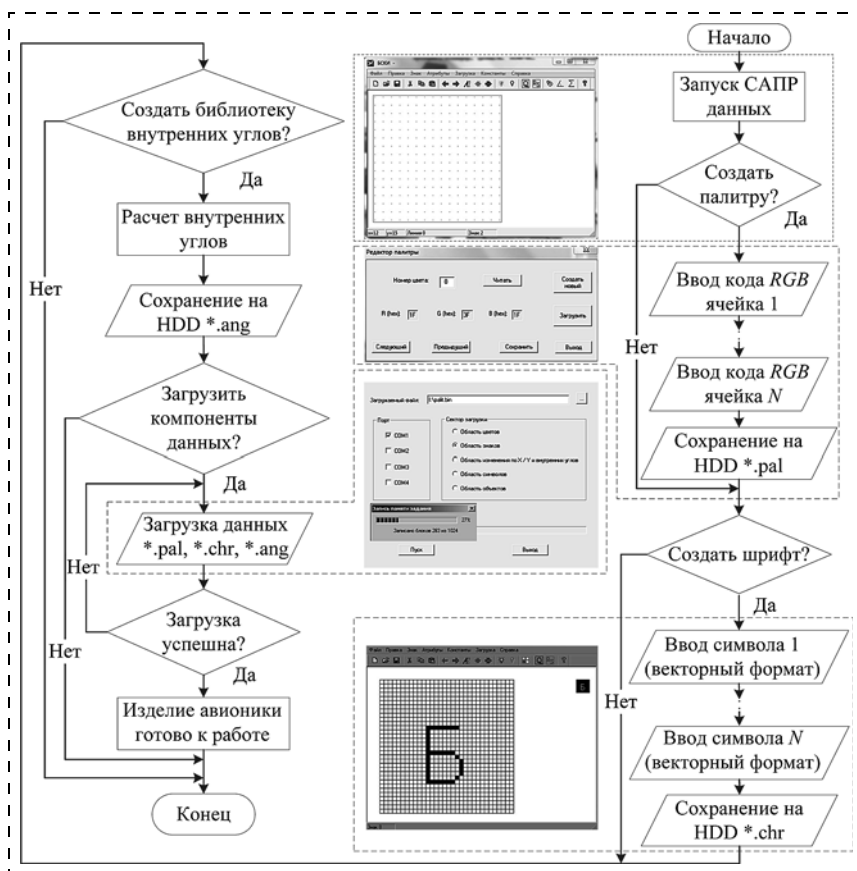


Рис. 4. Алгоритм подготовки и загрузки компонентов данных в МФЦИ

троля целостности занесения данных по значениям контрольных сумм. Алгоритм подготовки и занесения в МФЦИ компонентов данных и программ приведен на рис. 4. Загружаемые файлы компонентов данных условно обозначены как *.pal, *.chr, *.ang соответственно для файлов палитры, библиотеки шрифтов и символов согласованной конфигурации, библиотеки внутренних углов;

- программная обработка данных. Группу технического обеспечения САПР, предназначенного для решения этой задачи, составляют: ИЭВМ; светотехнический стенд, включающий цифровой фотометр, яркомер, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), лампы внешней освещенности и вентилятор обдува ЖК экрана; технологическое оборудование и кабели связи; источники питания. Группа предоставляет оператору возможность измерения яркости свечения экрана МФЦИ в любом цвете (оттенке цвета), включая фоновый (черный, серый), передачи результатов измерений яркости ЖК экрана МФЦИ в ИЭВМ по технологическому интерфейсу, расчета яркостного контраста элементов изображения на экране МФЦИ в условиях воздействия внешней освещенности уровня от 0 до 75 клк;
- отображение и документирование данных. Группу технического обеспечения САПР, предназначенного для решения этой задачи, составляют ИЭВМ и принтер. Группа предоставляет оператору возможность оперативного представления и документирования полученных результатов (проектных решений) по выбору компонентов цветовой палитры МФЦИ, возможность подготовки научно-технического отчета о полученных результатах исследования. Группа позволяет оператору изменять производительность своей работы на АРМ путем использования ИЭВМ разного типа, путем использования мультипрограммных и диалоговых режимов работы прикладного ПО, установленного на ИЭВМ;
- поддержка архивирования готовых проектных решений. Техническое обеспечение САПР, предназначенное для решения этой задачи, составляет ИЭВМ. ИЭВМ позволяет оператору сохранять полученные в процессе исследования компоненты цветовой палитры МФЦИ, а также сравнивать результаты проектных решений, полученных для различных моделей МФЦИ, выполненных на базе ЖК экранов различных фирм-производителей, в условиях воздействия различных уровней внешней освещенности.

3. Методика и алгоритм автоматизации процедуры поиска проектного решения по выбору координат цветности палитры МФЦИ

Методика автоматизации поиска проектного решения. В процессе использования АРМ МФЦИ оператор получает автоматизированным способом

набор измерений яркости, выполняемых с помощью яркомера, и набор оценок яркостного контраста, вычисляемых на ИЭВМ, для цветов и оттенков, воспроизводимых на МФЦИ. Результатами измерений и оценок, полученных техническим обеспечением САПР в условиях воздействия на ЖК экран МФЦИ внешней освещенности уровня 75 клк, являются наборы значений:

$$\begin{aligned} & \{x_1^{c_1}, \tilde{x}_1^{c_1}, y_1^{c_1}, \tilde{y}_1^{c_1}, \tilde{b}_1^{c_1}, k_1^{c_1}\}, \{x_2^{c_1}, \tilde{x}_2^{c_1}, y_2^{c_1}, \tilde{y}_2^{c_1}, \tilde{b}_2^{c_1}, k_2^{c_1}\}, \dots, \\ & \{x_{m_1}^{c_1}, \tilde{x}_{m_1}^{c_1}, y_{m_1}^{c_1}, \tilde{y}_{m_1}^{c_1}, \tilde{b}_{m_1}^{c_1}, k_{m_1}^{c_1}\}, \\ & \{x_1^{c_2}, \tilde{x}_1^{c_2}, y_1^{c_2}, \tilde{y}_1^{c_2}, \tilde{b}_1^{c_2}, k_1^{c_2}\}, \{x_2^{c_2}, \tilde{x}_2^{c_2}, y_2^{c_2}, \tilde{y}_2^{c_2}, \tilde{b}_2^{c_2}, k_2^{c_2}\}, \dots, \\ & \{x_{m_2}^{c_2}, \tilde{x}_{m_2}^{c_2}, y_{m_2}^{c_2}, \tilde{y}_{m_2}^{c_2}, \tilde{b}_{m_2}^{c_2}, k_{m_2}^{c_2}\}, \\ & \dots \\ & \{x_1^{c_s}, \tilde{x}_1^{c_s}, y_1^{c_s}, \tilde{y}_1^{c_s}, \tilde{b}_1^{c_s}, k_1^{c_s}\}, \{x_2^{c_s}, \tilde{x}_2^{c_s}, y_2^{c_s}, \tilde{y}_2^{c_s}, \tilde{b}_2^{c_s}, k_2^{c_s}\}, \dots, \\ & \{x_{m_s}^{c_s}, \tilde{x}_{m_s}^{c_s}, y_{m_s}^{c_s}, \tilde{y}_{m_s}^{c_s}, \tilde{b}_{m_s}^{c_s}, k_{m_s}^{c_s}\}, \end{aligned}$$

где x^c, y^c — координаты цветности, рассчитанные по формулам (1), (2) для десятичных кодов RGB c -го цвета (оттенка), отображаемого на экране МФЦИ; $\tilde{x}^c, \tilde{y}^c$ — координаты цветности, полученные от измерительной аппаратуры на АРМ для c -го цвета (оттенка); $\tilde{b}^c$ — измеренная яркость c -го цвета (оттенка); k^c — оцененное значение яркостного контраста c -го цвета (оттенка); m — число существующих измерений для одного наименования цвета; s — число цветов (оттенков), имеющих различные наименования и используемых в палитре МФЦИ; $c \in c_1, \dots, c_s, m \in m_1, \dots, m_s$.

Опытным путем замечено, что расчетные и измеренные значения (x, y) -координат цветности в ряде экспериментов с ЖК экранами МФЦИ различных производителей не совпадают с точностью до погрешности измерений. Значимые отклонения $|x - \tilde{x}|, |y - \tilde{y}|$ обусловлены особенностями технологии изготовления ЖК матриц и принятыми разработчиками решениями по соблюдению баланса белого цвета (точки белого). В частности, может использоваться как стандарт МКО, принятый в 1931 г., так и стандарт МКО, принятый в 1964 г. В выражении (1) следует использовать соответствующие принятому стандарту МКО значения $X_r, X_g, X_b, Y_r, Y_g, Y_b, Z_r, Z_g, Z_b$ — "профиль" ЖК матрицы, — являющиеся уникальными для разных систем кодирования цвета и балансов белого цвета. Примеры [17] значений параметров XYZ преобразования (1) и координат цветности точки белого цвета преобразования (2) в стандартах МКО 1931 г., МКО 1964 г. приведены в таблице. Нижний индекс 10 у переменных X, Y, Z, x, y определяет принадлежность этих величин к МКО 1964 г.

Значения параметров XYZ и (x, y)-координат цветности для точки белого цвета в стандартах МКО 1931 г., 1964 г.

Тип системы представления точки белого	Цветовое пространство XYZ, МКО, 1931 г.			Координаты цветности точки белого	
	X	Y	Z	x	y
D-50	96,41	100	82,50	0,3457	0,3585
D-55	95,68	100	92,14	0,3324	0,3474
D-65	95,04	100	108,9	0,3127	0,329
D-75	94,97	100	122,6	0,2991	0,3149
Тип системы представления точки белого	Цветовое пространство X ₁₀ Y ₁₀ Z ₁₀ , МКО, 1964 г.			Координаты цветности точки белого	
	X ₁₀	Y ₁₀	Z ₁₀	x ₁₀	y ₁₀
D-50	96,71	100	81,41	0,3477	0,3596
D-55	95,80	100	90,93	0,3341	0,3488
D-65	94,81	100	107,3	0,3138	0,331
D-75	94,42	100	120,6	0,2997	0,3174

Важно также заметить, что число m существующих результатов измерений для одного фиксированного наименования цвета (оттенка) определяется:

- диапазоном длин волн, отведенных в НТД для данного наименования оттенка (цвета), т. е. существуют $(x_{\min}^c, y_{\min}^c)$, $(x_{\max}^c, y_{\max}^c)$, такие что $x_{\min}^c = x_1^c$, $y_{\min}^c = y_1^c$, $x_{\max}^c = x_{m_s}^c$, $y_{\max}^c = y_{m_s}^c$, и видом ограничивающей функции (рис. 5, а, см. третью сторону обложки), определяющей область одного цвета на XY -плоскости, внутри которой наименование цвета считается "постоянным";
- дискретностью изменения (x, y) -координат, определяемой путем решения уравнений (1) и вычисления преобразований (2) для каждого дискретного шага кода RGB .

Оценка яркостного контраста для c -го цвета в точке (x_i, y_j) вычисляется как

$$k^c(x_i, y_j) = (\tilde{b}^c - \tilde{b}_0) / \tilde{b}_0, \quad i = 1, 2, \dots, m_s, j = 1, 2, \dots, s, \quad (3)$$

где $\tilde{b}_0$ — измеренное яркомером значение яркости фона. Черному фону соответствует цвет, индицируемый на экране МФЦИ с комбинацией десятичных кодов $R = G = B = 0$.

На рис. 5, б (см. третью сторону обложки) приведен пример поверхности, полученной в результате оценок распределения значений яркостного контраста изображения в окрестностях (x, y) -координат белого цвета $[0, 3 \dots 0, 35]$ для ограничивающей функции типа квадрат. Как следует из анализа рис. 5, б, в распределении яркостного контраста присутствуют точки локальных и глобального максимумов, имеющих проекции на XY -плоскость, и точки минимума значений k . Для практического использования важными являются значения k , превышающее установленное в НТД для бортового средства отображения информации значение 2, т. е. $k > 2$.

При решении оптимизационной задачи актуальным является значение $\hat{k}$ в точке глобального максимума (супремума) и соответствующие этому значению $(\hat{x}, \hat{y})|_c = \text{white}$ — координаты цветности.

Очевидно, координаты $(\hat{x}, \hat{y})|_c = \text{white}$ определяют точку на графике рис. 2, в, обладающую для данного МФЦИ наилучшими визуальными характеристиками восприятия человеком (в белом цвете). Аналогично могут быть получены распределения поверхностей для значений яркостного контраста изображений и соответствующие им точки супремумов $\{\hat{k}^c, (\hat{x}^c, \hat{y}^c)\}$, $c = 1, 2, \dots, s$, в зеленом, красном, синем, голубом, коричневом, желтом и др. цветах (оттенках), предусмотренных руководством 25-11А для использования при создании бортовых индикационных кадров авионики.

Алгоритм автоматизации поиска проектного решения. Алгоритм поиска точки глобального максимума на двумерной поверхности реализуется на ИЭВМ технического обеспечения САПР и приведен на рис. 6. Основу алгоритма составляет математический аппарат метода пошагового поиска, который является разновидностью метода градиентного поиска [16], относящегося к категории методов автоматизированного поиска оптимальных проектных решений, включенных в математическое обеспечение САПР автоматизированного рабочего места МФЦИ.

Метод предусматривает пошаговый анализ значений дискретной функции поверхности, в которых определен контраст изображения для каждого фиксированного цвета ($c = \text{const}$), с вычислением целевой функции вида

$$\hat{k}^c = \max\{k^c(x_i^c, y_j^c)\}, \quad i = 1, 2, \dots, m_s, j = 1, 2, \dots, s, \quad (4)$$

где $x_{\min}^c \leq x_i^c \leq x_{\max}^c$, $y_{\min}^c \leq y_j^c \leq y_{\max}^c$, т. е. анализ проводится в окрестностях значений (x, y) -координат для c -го цвета.

Начальными условиями для алгоритма рис. 6 являются:

- матрица "профиля" ЖК экрана с переменными $X_r, X_g, X_b, Y_r, Y_g, Y_b, Z_r, Z_g, Z_b$, значения которых определяются стандартом МКО и выбранным в нем оператором типом системы оценки баланса белого цвета (точки белого цвета) — D-75, D-65, D-55, D-50;
- координаты $(x_{\min}^c, y_{\min}^c)$, $(x_{\max}^c, y_{\max}^c)$, задающие на XY -плоскости граничные условия для цвета (оттенка), в пределах которого наименование цвета остается "постоянным".

Основу алгоритма составляет тройной цикл полного перебора десятичных кодов RGB , изменяющих свое значение в пределах $[0 \dots 255]$, последовательно для всех трех компонентов (красного, зеленого и си-

него), с вычислением в каждой точке, удовлетворяющей условию $x_{\min}^c \leq x_i^c \leq x_{\max}^c$, $y_{\min}^c \leq y_j^c \leq y_{\max}^c$, значения яркостного контраста изображения. Шаг инкрементирования каждого десятичного компонента RGB минимально возможный, дискретный, равен единице.

Одновременно в цикле модифицируются переменные, определяющие точку экстремума $\{\hat{k}^c, (\hat{x}^c, \hat{y}^c)\}$ с максимальным значением контраста в данном цвете, фиксируется также значение кода $\hat{R} \hat{G} \hat{B}$, при котором достигается эта точка. Яркость фона $\tilde{b}_0$ в алгоритме определяется на начальном этапе путем измерения на ЖК экране МФЦИ яркости изображения, индицируемого с кодами $R = G = B = 0$.

Граничные условия определяются видом и параметрами ограничивающей функции для каждого фиксированного цвета (оттенка) и могут быть рассчитаны непосредственно в цикле анализа значений точек поверхности. В предлагаемом алгоритме ограничивающей функцией является прямоугольник, координаты которого задаются на начальном этапе эксперимента для каждого наименования цвета, используемого в цветовой палитре МФЦИ.

Как следует из анализа рис. 5, а, перспективными для практического использования могут также быть ограничивающие функции типа окружность. В работе [18] приведена методика Мак-Адама, описывающая принцип построения на XU -плоскости ограничивающих функций типа эллипс с оценкой значений параметров эллипсов в зависимости от длины световой волны для различных цветов и оттенков.

Важно заметить, что в отличие от методов случайного поиска, где анализируются значения функции поверхности в случайно выбираемых точках (x_i, y_j) , наличие граничных условий на изменение аргументов функции поверхности и априори дискретный характер изменения этих аргументов

$\Delta x^c = x_{i+1}^c - x_i^c$, $\Delta y^c = y_{j+1}^c - y_j^c$ позволя-

ют методу пошагового поиска гарантировать нахождение глобального максимума поверхности автоматизированным способом за ограниченное время.

Поскольку алгоритм поиска реализуется на ИЭВМ технического обеспечения САПР в составе АРМ МФЦИ, у оператора нет необходимости проводить процедуру измерения яркости каждого цвета (оттенка) и процедуру оптимизации поиска максимума контраста изображения на измеренном

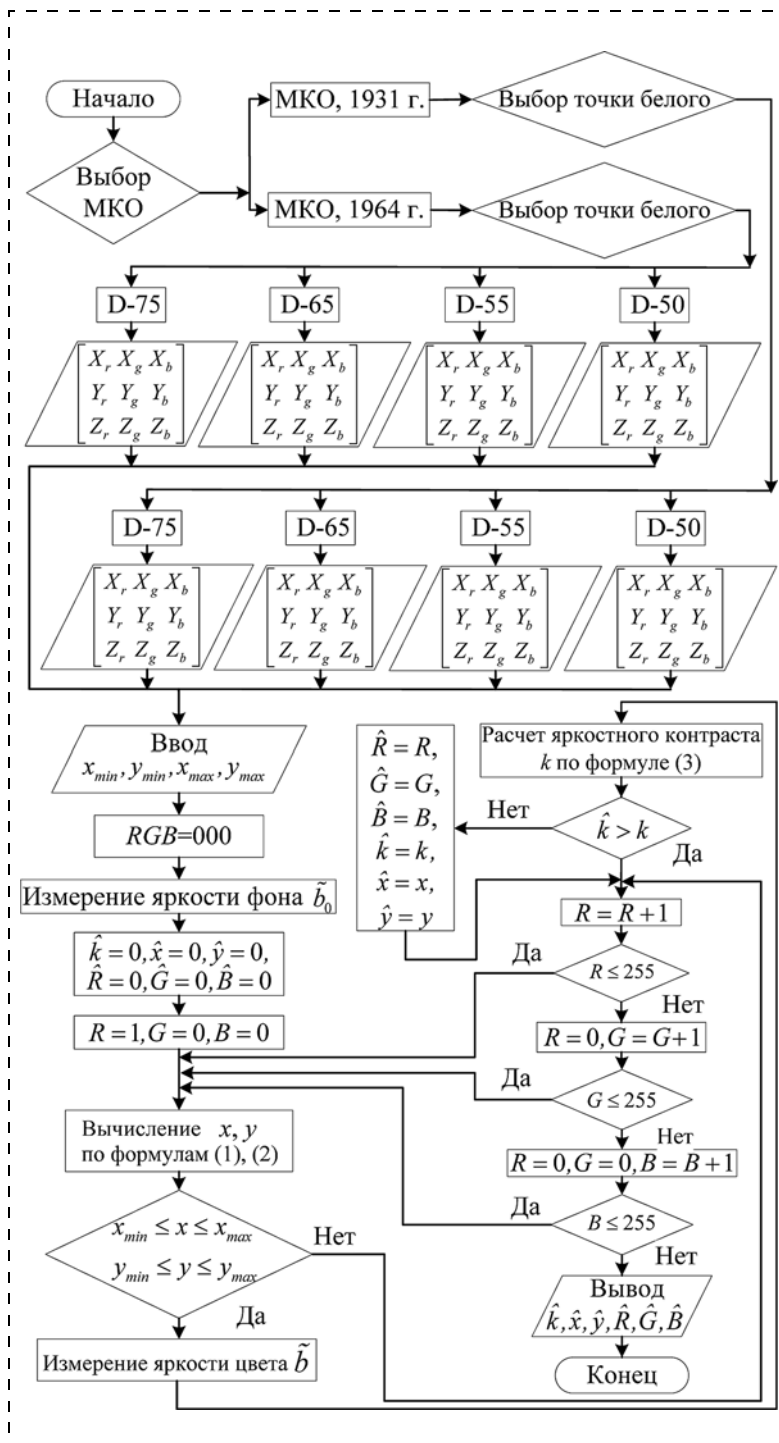


Рис. 6. Алгоритм поиска глобального максимума двумерной поверхности распределения контраста изображения в одном цвете

множестве точек отдельно. Расчеты и измерения осуществляются непосредственно в основном цикле алгоритма автоматизированным способом и только для тех точек XU -плоскости, которые оказываются внутри граничных условий. Объединение процедур позволяет оператору существенно сократить время (трудоемкость) поиска оценок значений координат цветности, обладающих наилучшими визуальными характеристиками восприятия для человека.

4. Результаты оценки значений координат цветности для цветовой палитры МФЦИ

Для определения компонентов кода *RGB* цветов, используемых при индикации пилотажно-навигационных параметров и геоинформационных данных во всех режимах эксплуатации аппаратуры, была проведена серия экспериментов с участием САПР АРМ МФЦИ. Оценке подлежала цветовая палитра, используемая в составе МФЦИ, и возможности МФЦИ для отображения палитры. На МФЦИ отображались фрагменты рабочих кадров изображений [19], формируемых в режиме имитации работы пилотажно-навигационного комплекса. Цветовая палитра соответствовала требованиям руководства 25-11А по сертификации систем электронной индикации самолетов.

Как показали эксперименты, МФЦИ в режиме индикации, предложенной первоначально разработчиками и соответствующей руководству 25-11А цветовой палитры, не отвечает требованиям НТД, ГОСТ к средствам отображения информации по значению яркостного контраста. С целью определить значения кодов компонентов *RGB* цветов, устойчивых к уровню внешней засветки изображения на ЖК экране, с участием авторов была разработана специализированная программа для модификации кодов *RGB* в цветовой палитре, заносимых в ПЗУ цветов графического контролера (см. рис. 1) на АРМ.

Уникальные коды *RGB* цветов, соответствующие требованиям НТД по значению яркостного контраста и полученные в результате серии экспериментов, впоследствии были преобразованы как *RGB* → *XYZ* → (*x*, *y*)-координаты цветности и сформировали палитру, внедренную сегодня в изделиях МФЦИ.

Результаты преобразований *RGB* → *XYZ* → (*x*, *y*) приведены на рис. 7 (см. третью сторону обложки) отдельно для цветов, используемых для отображения значений пилотажно-навигационных параметров (рис. 7, а), и цветов, используемых для отображения геоинформационных данных (рис. 7, б). В общем случае это две различных цветовых палитры, так как цвета, используемые в режиме совмещения изображения не должны сливаться на одном средстве индикации. Штриховой линией на рис. 7 выделена видимая человеческим глазом часть цветов и оттенков на *XY*-плоскости.

Заключение

В соответствии с действующей нормативно-технической документацией координаты цветности цветовой палитры являются специфическими для каждого вида отображаемой в авионике информации:

- пилотажно-навигационных параметров;
- картографической (геоинформационной) информации;
- метеорадиолокационной информации и т. д.

Вместе с тем, известно, что МФЦИ работает в режимах индикации, предполагающих совмещение

(одновременное отображение) индикационных кадров, содержащих информацию разных видов: навигационную и картографическую, навигационную и метеорадиолокационную и т. д. В этом случае фоном изображения будет не черный или серый цвет, как это принято в авиационной промышленности, а цвет изображения, на фоне которого осуществляется вывод информации. В частности, в режиме "навигация и картография" пилотажно-навигационные параметры индицируются на фоне "подложки" — цифровой цветной карты местности, смещающейся на экране МФЦИ в соответствии с движением летательного аппарата.

Таким образом, проблема выбора компонентов цветов цветовой палитры, устойчивой для восприятия человеком, должна решаться путем анализа измерений яркости (оценки яркостного контраста) элементов изображения, выводимых на фоне всех возможных цветов цветовой палитры МФЦИ, которые могут быть задействованы в качестве фоновой "подложки" изображения.

Кроме того, в результате проведенных экспериментов замечено, что ЖК экранам, выполненным на базе газоразрядных ламп подсвета, свойственно постепенное увеличение яркости изображения из-за разогрева инертного газа, возникающего как под воздействием напряжения поджига, формируемого инвертором, так и под воздействием собственной теплоты от работы ламп в конструктиве ЖК экрана конечного объема. Рост яркости в течение первых 10...15 мин работы составляет [20] до 30...40 % от уровня яркости по включению.

В связи с этим измерение яркости элементов изображения, выводимых на экран МФЦИ с газоразрядным подсветом, необходимо выполнять после достижения стационарного (по яркости свечения экрана) режима индикации параметров, не ранее, чем через 15...20 мин после начала работы изделия. В МФЦИ с ЖК экранами, выполненными на базе подсвета из светодиодов, данный эффект отсутствует. Яркость изображения таких МФЦИ также превосходит в несколько раз яркость изображения МФЦИ с газоразрядным подсветом ЖК экрана.

Список литературы

1. Жаринов И. О., Жаринов О. О. Бортовые средства отображения информации на плоских жидкокристаллических панелях: учеб. пособие // Информационно-управляющие системы. СПб: ГУАП, 2005. 144 с.
2. Жаринов И. О., Емец Р. Б. Индикационное оборудование в авиации XXI века // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2003. № 11. С. 193—195.
3. Парамонов П. П., Копорский Н. С., Видин Б. В., Жаринов И. О. Многофункциональные индикаторы на плоских жидкокристаллических панелях: наукоемкие аппаратно-программные решения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2004. № 3. С. 238—245.
4. Парамонов П. П., Ильченко Ю. А., Жаринов И. О., Тарасов П. Ю. Структурный анализ и синтез графических изображений на экранах современных средств бортовой индикации на плоских жидкокристаллических панелях // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 5. С. 50—57.

5. **Парамонов П. П., Ильченко Ю. А., Жаринов И. О.** Теория и практика статистического анализа картографических изображений в системах навигации пилотируемых летательных аппаратов // Датчики и системы. 2001. № 8. С. 15—19.
6. **Парамонов П. П., Костишин М. О., Жаринов И. О., Нечаев В. А., Сударчиков С. А.** Принцип формирования и отображения массива геоинформационных данных на экран средств бортовой индикации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6. С. 136—142.
7. **Костишин М. О., Жаринов И. О., Жаринов О. О., Нечаев В. А., Суслов В. Д.** Оценка точности визуализации местоположения объекта в геоинформационных системах и системах индикации навигационных комплексов пилотируемых летательных аппаратов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1. С. 87—93.
8. **Мартынюк М. В.** Оценка границ областей метамерии для набора светочувствительных приемников // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. 2012. № 20. С. 81—90.
9. **Хорунжий М. Д., Газеева И. В., Гусев В. П., Трубинова Т. А.** Оценка качества цветопередачи в системах визуализации цифровых изображений: учеб. пособие. СПб: Изд. СПбГУКиТ, 2010. 95 с.
10. **Бондаренко М. Ф., Шабанов-Кушнаренко С. Ю., Шабанов-Кушнаренко Ю. П.** Разработка системы кодирования цвета // Бионика интеллекта: научно технический журнал. 2009. № 2. С. 13—23.
11. **Хорунжий М. Д.** Метод количественной оценки цветовых различий при восприятии цифровых изображений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. № 1. 2008. С. 136—144.
12. **Парамонов П. П., Гатчин Ю. А., Жаринов И. О., Жаринов О. О., Дейко М. С.** Принципы построения отраслевой сис-

- темы автоматизированного проектирования в авиационном приборостроении // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 6. С. 111—117.
13. **Сабо Ю. И., Жаринов И. О.** Критерий подобия проектных решений требованиям технического задания в авионике // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 3. С. 57—63.
14. **Гатчин Ю. А., Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Архитектура программного обеспечения автоматизированного рабочего места разработчика бортового авиационного оборудования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2. С. 140—141.
15. **Дейко М. С., Жаринов И. О.** Применение симплекс-метода и метода искусственного базиса при проектировании бортового приборного оборудования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 1. С. 124—129.
16. **Гайкович А. И.** Основы теории проектирования сложных технических систем. СПб: НИЦ "МОРИНТЕХ", 2001. 432 с.
17. **Janos Schanda.** Colorimetry Understanding the CIE System. Wiley-Interscience John Wiley & Sons, INC., Publication, 2007, 499 p.
18. **Агостон Ж.** Теория цвета и ее применение в искусстве и дизайне: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 184 с.
19. **Парамонов П. П., Коновалов П. В., Жаринов И. О., Кирсанова Ю. А., Уткин С. Б.** Реализация структуры данных, используемых при формировании индикационного кадра в бортовых системах картографической информации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2. С. 165—167.
20. **Жданкин В.** Передовые технологии фирмы Sharp в изготовлении ЖК-дисплеев для различных применений // Современная электроника. 2006. № 1. С. 14—19.

Algorithm and Methodology for Automation of Estimation Procedure of Chromaticity Coordinates of Pixel Airborne Avionics Display

A. V. Shukalov, P. P. Paramonov, I. O. Zharinov, igor_rabota@pisem.net,
SPb Scientific Design Bureau "Electroavtomatika" n. a. P. A. Efimova,
198095, Saint Petersburg, Russian Federation,

O. O. Zharinov, Saint-Petersburg state university of aerospace equipment,
190000, Saint Petersburg, Russian Federation,

M. O. Kostishin, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies,
Mechanics and Optics, 197101, Saint Petersburg, Russian Federation

Date received: 19.05.2014

The authors discuss the design of modern on-board equipment for visualization of the air navigation parameters and geo-details (digital district map) with certain requirements to the quality of the visualized information to be displayed. This kind of quality may be characterized in terms of brightness contrast for each color displayed on the screen. In order to ensure stable readability of the image for a pilot, a special procedure should choose chromaticity the coordinates of the image elements. The problem is considered of the research of the avionics on-board indication equipment in order to determine the set of chromaticity coordinate values for the displayed image with the use of automated design tools, which would allow an enhanced visual perception of the image details in the presence of intense external illumination. Various color coding systems used in the on-board indication equipment based on liquid crystal panels (systems of RGB and XY formats) are examined. The calculation of the chromaticity coordinates was based on Maxwell's color mixing triangle by mutual transformations between the elements of XY-plane and decimal codes of RGB-palette, used in the software of the on-board indication equipment. The scheme workstation for the research is proposed, the main components of the developed automated design tools, installed as part of the workstation, are described. The experimental results containing the measures of the brightness levels and estimated brightness contrast values, which were obtained for the given set of colors, are presented. An algorithm for an automated search for a global maximum on the function of two variables, which represents brightness contrast distribution in the chromaticity coordinates plane, is proposed. The decision-making rule approving the use of RGB-codes is the case when the brightness contrast of the test image displayed in any predefined color exceeds two. The results of the research are the methodology and the algorithm of searching the chromaticity coordinate values, which ensure the maximal brightness contrast level and the corresponding values of chromaticity coordinates at the points of maximal contrast.

Keywords: display, avionics, luminance contrast, color coding system, the transformation of the Grassmann, optimization problem

For citation:

Shukalov A. V., Paramonov P. P., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Kostishin M. O. Algorithm and Methodology for Automation of Estimation Procedure of Chromaticity Coordinates of Pixel Airborne Avionics Display, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 195–204.

DOI: 10.17587/mau.16.195-204

References

1. **Zharinov I. O., Zharinov O. O.** *Informacionno-upravljajushhie sistemy* (Information and Control Systems). SPb: GUAP, 2005. 144 p. (in Russian).
2. **Zharinov I. O., Emec R. B.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2003, no. 11, pp. 193–195 (in Russian).
3. **Paramonov P. P., Koporskiy N. S., Vidin B. V., Zharinov I. O.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2004, no. 3, pp. 238–245 (in Russian).
4. **Paramonov P. P., Il'chenko Ju. A., Zharinov I. O., Tarasov P. Ju.** *Aviakosmicheskoe Priborostroenie*, 2004, no. 5, pp. 50–57. (in Russian).
5. **Paramonov P. P., Il'chenko Ju. A., Zharinov I. O.** *Datchiki i Sistemy*, 2001, no. 8, pp. 15–19 (in Russian).
6. **Paramonov P. P., Kostishin M. O., Zharinov I. O., Nechaev V. A., Sudarchikov S. A.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2013, no. 6, pp. 136–142 (in Russian).
7. **Kostishin M. O., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Nechaev V. A., Suslov V. D.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2014, no. 1, pp. 87–93 (in Russian).
8. **Martynjuk M. V.** *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R. E. Alekseeva*, 2012, no. 20, pp. 81–90 (in Russian).
9. **Horunzhij M. D., Gazeeva I. V., Gusev V. P., Trubnikova T. A.** *Ocenka kachestva cvetoperedachi v sistemah vizualizacii cifrovyyh izobrazhenij: uchebnoe posobie* (Quality assessment of color in visualization systems digital imaging), Saint Petersburg, Izdatel'stvo. SPbGUKi, 2010, 95 p. (in Russian).

10. **Bondarenko M. F., Shabanov-Kushnarenko S. Ju., Shabanov-Kushnarenko Ju. P.** *Bionika Intellekta: Nauchno Tekhnicheskij Zhurnal*, 2009, no. 2, pp. 13–23 (in Russian).

11. **Horunzhij M. D.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2008, no. 1, pp. 136–144 (in Russian).

12. **Paramonov P. P., Gatchin Ju. A., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Dejko M. S.** *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mehaniki i optiki*, 2012, no. 6, pp. 111–117 (in Russian).

13. **Sabo Ju. I., Zharinov I. O.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2010, no. 3, pp. 57–63 (in Russian).

14. **Gatchin Ju. A., Zharinov I. O., Zharinov O. O.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2012, no. 2, pp. 140–141 (in Russian).

15. **Dejko M. S., Zharinov I. O.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2013, no. 1, pp. 124–129 (in Russian).

16. **Gajkovich A. I.** *Osnovy teorii proektirovaniya slozhnyh tekhnicheskikh system* (Fundamentals of the theory of the design of complex technical systems), Saint Petersburg, NIC "MORINTEH", 2001, 432 p. (in Russian).

17. **Janos Schanda.** *Colorimetry Understanding the CIE System*. Wiley-Interscience John Wiley & Sons, INC., Publication, 2007, 499 p.

18. **Agoston Zh.** *Teorija cveta i ee primenenie v iskusstve i dizajne*: Per. s angl, Moscow, Mir, 1982, 184 p. (in Russian).

19. **Paramonov P. P., Konovalov P. V., Zharinov I. O., Kirsanova Ju. A., Utkin S. B.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2013, no. 2, pp. 165–167 (in Russian).

20. **Zhdankin V.** *Sovremennaja Elektronika*, 2006, no. 1, pp. 14–19 (in Russian).

Corresponding author:

Zharinov Igor O., chef of learning-scientists center, Dr. Tecn. Sci, Assistance of Professor, SPb Scientific Design Bureau "Electroavtomatika" n. a. P. A. Efimova, 198095, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: igor_rabota@pisem.net

УДК 626.02.008

В. Ф. Филаретов, д-р техн. наук, зав. лаб., filaret@pma.ru,

А. Ю. Коноплин, ассистент, kayur-prim@mail.ru,

Н. Ю. Коноплин, лаборант, konoplin.nikita@gmail.com

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
Дальневосточный федеральный университет

Метод синтеза систем автоматической коррекции линейных перемещений подводных аппаратов¹

Обсуждается метод синтеза системы автоматической коррекции линейных перемещений подводного аппарата. Предложенная система при нежелательных отличиях от нуля значениях углов его крена и дифферента, вызванных внешними силовыми и моментными воздействиями, автоматически изменяя тяги соответствующих движителей в зависимости от текущих значений указанных углов, неизменно обеспечивает высокоточное перемещение этого аппарата в заданном направлении. Кроме того, система позволяет устранить смещения подводного аппарата от заданной пространственной траектории, вызванные его несимметричностью, а также различными значениями присоединенных масс жидкости и коэффициентов вязкого трения при движении этого аппарата по разным степеням свободы.

Представлены результаты моделирования, подтверждающие высокую эффективность функционирования синтезированной комплексной системы управления, которая имеет простую практическую реализацию и не требует установки на подводный аппарат дополнительного оборудования и навигационных комплексов.

Ключевые слова: подводный аппарат, система управления, автоматическая коррекция, линейные перемещения, доплеровский лаг

¹ Работа проводилась при финансовой поддержке Научного фонда ДВФУ (соглашение № 13-06-0112-м а), Министерства образования и науки Российской Федерации (Государственное задание 1141), а также РФФИ (грант 13-07-00741).

Введение

В настоящее время с помощью телеуправляемых и обитаемых подводных аппаратов (ПА) уже выполняются многие исследовательские и технологические работы в глубинах Мирового океана. Интенсивное расширение областей использования этих ПА непрерывно повышает требования к их системам управления (СУ), которые должны обеспечивать точное перемещение указанных объектов в водной среде.

В процессе выполнения подводных работ операторы вручную с помощью органов управления или целеуказателей задают желаемые направления движения ПА. От точности перемещений ПА в заданном направлении зависит успех выполнения многих подводных технологических операций. Существующие СУ [1–3] позволяют эффективно управлять движением ПА только при отсутствии у них неконтролируемых углов крена и дифферента. Однако под влиянием моментных воздействий со стороны захваченных грузов, подводного кабеля, а также при наличии несимметричности ПА и иных возмущающих факторов у этих аппаратов в процессе движения часто появляются заранее неизвестные дифферент и крен.

Скомпенсировать нежелательные угловые смещения ПА с помощью тяг, создаваемых их движителями, в ряде случаев невозможно, так как схемы установки движителей большинства ПА не позволяют управлять углами крена и дифферента. Кроме того, постоянная стабилизация крена и дифферента в ручном режиме оказывает дополнительную нагрузку на оператора, а в автоматическом режиме требует использования специальных следящих систем [4] и приводит к значительным дополнительным энергетическим затратам.

Смещения ПА от заданного направления движения, обусловленные неуправляемым изменением их пространственной ориентации, при визуальном контакте с объектом работ могут устраняться операторами, а при наличии навигационных систем — в автоматическом режиме. Однако реализация эффективного управления при крене и дифференте ПА очень затруднена, что неизбежно снижает качество выполнения подводных технологических операций.

В результате возникает задача обеспечения точного перемещения ПА в задаваемых направлениях даже при появлении у них нежелательных произвольных углов крена и дифферента в процессе движения.

1. Постановка задачи

Требуется разработать метод синтеза эффективной системы автоматической коррекции сигналов управления линейными перемещениями ПА, обеспечивающей его точные движения в заданном направлении даже в том случае, когда ПА постоянно имеет произвольно появляющиеся углы крена и дифферента.

2. Определение выражений для автоматической коррекции вектора линейных перемещений ПА

На рис. 1 схематически показан ПА, который за счет внешнего силового и моментного воздействия в общем случае может иметь произвольные угловые смещения по крену γ и дифференту α , точно измеряемые бортовыми гироскопами.

С центром масс C ПА, который совпадает с центром его величины, совмещены начала полусвязанной XYZ и жестко связанной $X^*Y^*Z^*$ с его корпусом правых прямоугольных систем координат (СК). Соответствующие оси этих СК при нулевых значениях углов γ и α совпадают. При этом ось Z всегда направлена вертикально вверх, ось X^* совпадает с продольной осью ПА, а ось X совпадает с проекцией оси X^* на горизонтальную плоскость.

Вектор тяги ПА $\tau^*(t) = [\tau_x^*, \tau_y^*, \tau_z^*]^T$ всегда формируется в СК $X^*Y^*Z^*$, поскольку продольные оси его движителей, создающих соответствующие тяги, жестко связаны с этой СК. Желаемый программный вектор тяги $\tau(t) = [\tau_x, \tau_y, \tau_z]^T$ формируется оператором или программным устройством в СК XYZ (см. рис. 1). Он определяет требуемое направление перемещения ПА в абсолютной СК $X_aY_aZ_a$. Если внешние силовые и моментные воздействия отсутствуют, то за счет своей остойчивости ПА имеет нулевой крен и дифферент. В этом случае вектор $\tau^*(t)$ совпадает по направлению с вектором $\tau(t)$, а его модуль с помощью СУ ПА формируется пропорционально модулю этого вектора.

Очевидно, что при появлении ненулевых значений γ и (или) α векторы $\tau^*(t)$ и $\tau(t)$ перестают совпадать, и ПА начинает перемещаться в направлении вектора $\tau^*(t)$, а не в правильном направлении, определяемом вектором $\tau(t)$. Для сохранения заданного направления движения ПА необходимо, учитывая текущие значения углов γ и (или) α , так изменить тяги соответствующих движителей ПА, чтобы в СК $X^*Y^*Z^*$ вместо вектора $\tau^*(t)$ появился новый вектор $\tau_p(t) = [\tau_{px}, \tau_{py}, \tau_{pz}]^T$, совпадающий в пространстве с вектором $\tau(t)$.

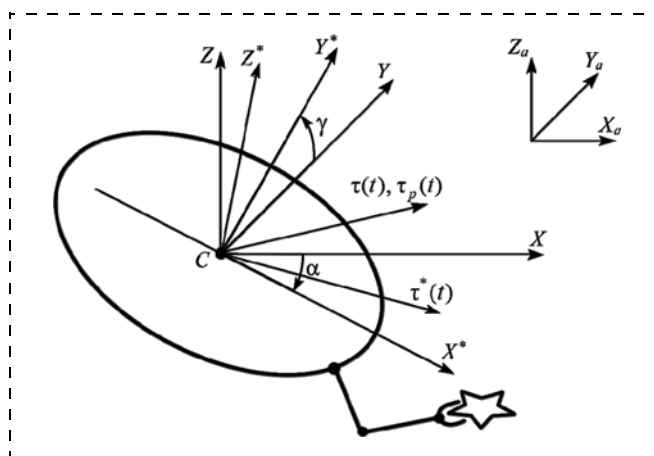


Рис. 1. Схема расположения осей СК XYZ и $X^*Y^*Z^*$ на ПА

Зная элементы вектора $\tau(t)$ в СК XYZ , элементы совпадающего с ним вектора $\tau_p(t)$ в СК $X^*Y^*Z^*$ можно получить с помощью выражения [5]

$$\tau_p(t) = R^T \tau(t), \quad (1)$$

где $R \in R^{3 \times 3}$ — матрица поворотов СК $X^*Y^*Z^*$ относительно СК XYZ , T — символ транспонирования.

Для определения элементов матрицы R необходимо представить поворот ПА вместе с СК $X^*Y^*Z^*$ в виде последовательности элементарных поворотов. При этом оси, относительно которых отсчитываются углы соответствующих поворотов СК $X^*Y^*Z^*$, и последовательность этих поворотов должны выбираться такими, чтобы получаемые при этом углы α и γ действительно соответствовали углам, которые будут измеряться бортовыми гироскопами [6]. Это условие выполняется при следующей последовательности элементарных поворотов СК $X^*Y^*Z^*$: вначале осуществляется ее поворот на угол α вокруг оси Y (ему соответствует матрица элементарного поворота $R_{Y,\alpha}$), а затем поворот на угол γ вокруг оси X^* (ему соответствует матрица элементарного поворота $R_{X^*,\gamma}$). Указанные матрицы поворотов имеют стандартный вид [7]:

$$R_{Y,\alpha} = \begin{bmatrix} C\alpha & 0 & S\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\alpha & 0 & C\alpha \end{bmatrix}, \quad R_{X^*,\gamma} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\gamma & -S\gamma \\ 0 & S\gamma & C\gamma \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $S\alpha = \sin\alpha$; $S\gamma = \sin\gamma$; $C\alpha = \cos\alpha$; $C\gamma = \cos\gamma$.

С учетом выражения (2) матрица R для описанной последовательности поворотов СК $X^*Y^*Z^*$ вместе с ПА имеет вид

$$R = R_{Y,\alpha} R_{X^*,\gamma} = \begin{bmatrix} C\alpha & S\alpha S\gamma & S\alpha C\gamma \\ 0 & C\gamma & -S\gamma \\ -S\alpha & C\alpha S\gamma & C\alpha C\gamma \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Необходимо подчеркнуть, что для определения элементов вектора $\tau_p(t)$ в выражении (1) можно использовать только матрицу (3), так как составленная посредством другой последовательности элементарных поворотов любая другая матрица не может быть реализована с использованием углов γ и α , измеряемых бортовыми гироскопическими приборами.

После подстановки транспонированной матрицы R в выражение (1) получим:

$$\tau_p(t) = \begin{bmatrix} \tau_x C\alpha - \tau_z S\alpha \\ \tau_x S\alpha S\gamma + \tau_y C\gamma + \tau_z C\alpha S\gamma \\ \tau_x S\alpha C\gamma - \tau_y S\gamma + \tau_z C\alpha C\gamma \end{bmatrix}.$$

В результате использование предложенной коррекции позволит оператору управлять желаемым вектором тяги $\tau(t)$, не учитывая появление у ПА произвольных углов α и γ . При этом разработанная система должна обеспечивать перемещения ПА в заданном направлении в СК $X_a Y_a Z_a$.

3. Исследование работы системы

Для исследования особенностей функционирования и эффективности системы коррекции линейных перемещений ПА использована математическая модель [3], упрощенная до шести нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих только поступательное движение ПА:

$$M\dot{v} + D(v)v + g(\eta) = \tau^*(t), \\ \dot{\eta} = J(\eta)v(t),$$

где $M \in R^{3 \times 3}$ — матрица массы ПА и присоединенных масс жидкости; $D(v) \in R^{3 \times 3}$ — матрица гидродинамических сил; $g(\eta) \in R^3$ — вектор гидростатических сил; $v(t) = [v_x, v_y, v_z]^T$ — вектор текущей скорости поступательного движения ПА в СК $X^*Y^*Z^*$; $J(\eta) \in R^{3 \times 3}$ — матрица перехода из СК $X^*Y^*Z^*$ в СК $X_a Y_a Z_a$; $\eta = [x_a, y_a, z_a]^T$ — вектор положения точки C в СК $X_a Y_a Z_a$.

Параметры модели ПА имеют следующие значения: $m_a = 300$ кг — масса ПА; $\lambda_{11} = 120$ кг, $\lambda_{22} = 140$ кг, $\lambda_{33} = 140$ кг ($\lambda_{ij} = 0$, $i \neq j$, $i, j = (1, 3)$) — соответствующие присоединенные массы жидкости; $Y_c = 0,02$ м — метацентрическая высота ПА; $d_{1x} = 40$ кг·с⁻¹, $d_{1y} = 50$ кг·с⁻¹, $d_{1z} = 50$ кг·с⁻¹ — коэффициенты вязкого трения, соответствующие линейной, а $d_{2x} = 15$ кг·м⁻¹, $d_{2y} = 25$ кг·м⁻¹, $d_{2z} = 25$ кг·м⁻¹ — квадратичной зависимостям гидродинамических сил от скорости движения ПА по его отдельным степеням свободы.

С помощью средств адаптивной коррекции [1] все движители ПА представлены в виде апериодических звеньев первого порядка с постоянными времени $T_d = 0,1$ с и коэффициентами усиления $K_d = 2$, а в модели описаны соответствующими дифференциальными уравнениями первого порядка.

При моделировании ПА имел $\alpha = 30^\circ$, а $\tau(t) = [15, 0, 0]^T$. В этом случае аппарат должен совершать прямолинейное движение в горизонтальной плоскости СК $X_a Y_a Z_a$, совпадающее осью X_a . На рис. 2 показаны смоделированные перемещения ПА x_{a1} и z_{a1} в СК $X_a Y_a Z_a$ без использования синтезированной системы, а также его перемещения x_{a2} и z_{a2} при введении предложенной коррекции.

Из рис. 2 видно, что наличие неучтенного дифферента в процессе движения ПА за 70 с приводит к его незапланированному смещению по оси Z_a

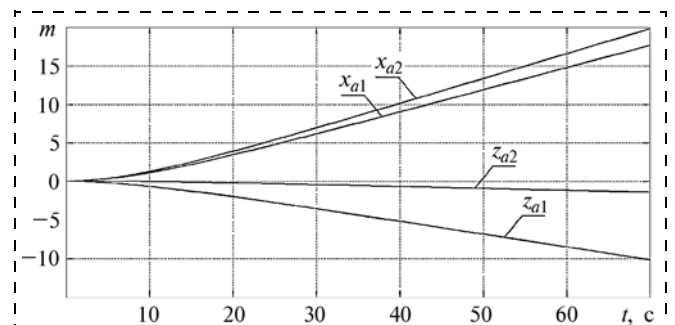


Рис. 2. Линейные перемещения ПА

на 10 м. Использование синтезированной коррекции, формирующей вектор $\tau_p(t)$, позволяет в 6,6 раза уменьшить смещение ПА z_{a2} по оси Z_a от предписанной прямолинейной траектории его движения, но это смещение все равно достигает 1,5 м. Причиной последнего является несимметричность ПА, а также различные значения присоединенных масс жидкости и коэффициентов вязкого трения при его движении по разным степеням свободы.

Если эти незначительные отклонения в процессе движения ПА становятся недопустимыми, то они могут устраняться оператором или автоматически за счет дополнительной коррекции вектора $\tau(t)$. При автоматической коррекции этого вектора целесообразно использовать информацию о текущем направлении $v(t)$, определяемом доплеровским лагом. Ниже будет рассмотрена система, обеспечивающая указанную автоматическую коррекцию вектора $\tau(t)$ с помощью доплеровского лага.

4. Дополнительная автоматическая коррекция вектора тяги ПА

Современные доплеровские лаги позволяют точно определить элементы вектора $v(t)$ в СК $X^*Y^*Z^*$ [7]. При смещении реального направления движения ПА, имеющего ненулевые углы α и γ , от направления, задаваемого в СК $X^*Y^*Z^*$ вектором $\tau_p(t)$, между векторами $v(t)$ и $\tau_p(t)$ возникает ненулевой угол $\varphi = \arccos\left(\frac{\tau_p(t)v(t)}{\|\tau_p(t)\|\|v(t)\|}\right)$ (рис. 3). Очевидно,

что для движения ПА в направлении, определяемом вектором $\tau_p(t)$, его СУ должна обеспечивать обнуление угла φ , формируя новый вектор тяги $\tau_d(t) = \tau_p(t) + \tau_k(t) \neq \tau_p(t)$, лежащий в плоскости, образованной векторами $\tau_p(t)$ и $v(t)$ (см. рис. 3). Здесь

$\tau_k(t) = k \frac{\mu(t)}{\|\mu(t)\|} \in R^3$ — дополнительный вектор тяги, перпендикулярный вектору $\tau_p(t)$, направленный в сторону компенсации угла φ и лежащий в одной плоскости с векторами $\tau_p(t)$, $v(t)$; k — положительный коэффициент, значение которого выбирается экспериментально с учетом конструкции ПА;

$\mu(t) = \tau_l(t) - v(t) \in R^3$ — вектор, определяющий направление вектора $\tau_k(t)$; $\tau_l(t) = \frac{\tau_p(t)}{\|\tau_p(t)\|} \|v(t)\| \cos \varphi$.

При $\|\mu(t)\| = 0$ СУ ПА формирует $\tau_k(t) = 0$. При $\|\tau_p(t)\| = \|v(t)\| = 0$ угол φ не вычисляется, так как ПА не движется.

При $\|\mu(t)\| = 0$ СУ ПА формирует $\tau_k(t) = 0$. При $\|\tau_p(t)\| = \|v(t)\| = 0$ угол φ не вычисляется, так как ПА не движется.

Схема автоматической следящей системы, обеспечивающей условие $\varphi \rightarrow 0$, представлена на рис. 4. На этой схеме введены следующие обозначения: БФТ — блок формирования вектора $\tau_p(t)$ согласно выражению (1); Г — блок гироскопов, измеряющий углы α и γ ; АЛ — абсолютный доплеровский лаг; ДК — движительный комплекс ПА; СУ — сис-

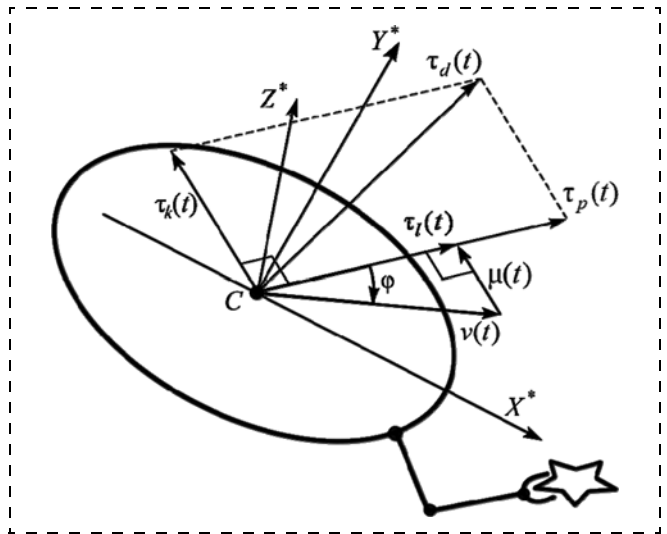


Рис. 3. ПА и скорректированный вектор тяги

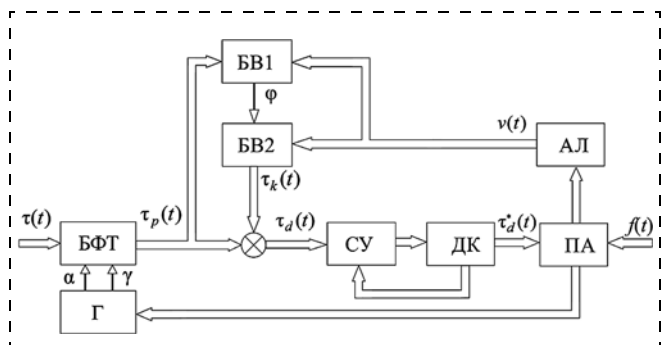


Рис. 4. Обобщенная схема синтезированной системы

тема управления ДК; БВ1 — блок вычисления угла φ ; БВ2 — блок вычисления вектора $\tau_k(t)$; $\tau_d^*(t)$ — реальный вектор тяги, формируемый ДК и воздействующий на ПА в процессе его движения; $f(t) \in R^6$ — вектор внешних силовых и моментных воздействий на ПА, приводящий к появлению ненулевых углов α и γ .

5. Исследование работы системы комплексной коррекции тяг ПА

На рис. 5 показаны результаты численного моделирования линейного перемещения ПА в горизонтальной плоскости с применением синтезированной комплексной СУ, изображенной на рис. 4, при условии, что в начале движения и далее он имел неизменяемый дифферент ($\alpha = 30^\circ$), $k = 10$, а задающим устройством в СК XYZ формировался желаемый вектор тяги $\tau(t) = [15, 0, 0]^T$.

Из рис. 5 видно, что даже при наличии большого дифферента ПА достаточно точно движется в горизонтальной плоскости в направлении, определяемом вектором $\tau(t)$. Его отклонение от заданной горизонтальной плоскости через 70 с после начала движения не превышает 0,3 м. Это незначительное

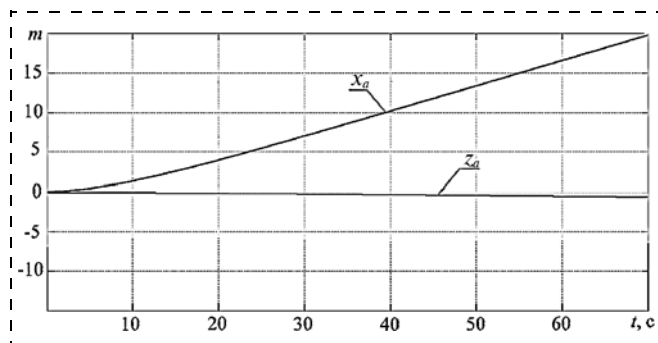


Рис. 5. Результаты моделирования работы синтезированной комплексной системы коррекции линейных перемещений ПА

отклонение обусловлено зоной нечувствительности при определении величины φ . С учетом полученных результатов моделирования можно утверждать, что использование синтезированной комплексной СУ позволяет автоматически учесть и успешно компенсировать влияние углов дифферента и крена при движении ПА на его заданное линейное перемещение к цели.

Заключение

В данной работе рассмотрен метод синтеза системы автоматической коррекции линейных перемещений ПА, которая при произвольных отличных

от нуля значениях углов его крена и дифферента, автоматически изменяя тяги соответствующих движителей в зависимости от текущих значений указанных углов, неизменно обеспечивает высокоточное перемещение этого аппарата в абсолютной СК в заданном направлении.

Разработанная система имеет простую практическую реализацию и не требует установки на ПА дополнительного оборудования и навигационных комплексов.

Список литературы

1. Филаретов В. Ф., Алексеев Ю. К., Лебедев А. В. Системы управления подводными роботами / Под ред. В. Ф. Филаретова. М.: Круглый год, 2001. 288 с.
2. Филаретов В. Ф., Лебедев А. В., Юхимец Д. А. Устройства и системы управления подводных роботов. М.: Наука, 2005. 270 с.
3. Fossen T. I. Guidance and control of ocean vehicles, John Wiley & Sons Ltd., 1994, 494 p.
4. Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 7. С. 29—34.
5. Fu K. S., Gonzalez R. C., Lee C. S. G. Robotics: control, sensing, vision and intelligence. McGraw-Hill, 1987. 580 p.
6. Фридлиндер Г. О., Козлов М. С. Авиационные гироскопические приборы. М.: Оборонгиз 1961 г., 390 с.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., 1973 г., 832 с.
8. Виноградов К. А., Кошкарёв В. Н., Осюхин Б. А., Хребтов А. А. Абсолютные и относительные лаги: Справочник. Л.: Судостроение, 1990 г., 264 с.

Method of Synthesis of Automatic Correction Systems of the Linear Displacements of the Underwater Vehicles

V. F. Filaretov, filaret@pma.ru, A. Yu. Konoplin, kayur-prim@mail.ru,
N. Yu. Konoplin, konoplin.nikita@gmail.com

Far Eastern Federal University, Sukhanova 8, Vladivostok 690950, Russia,
Institute for automation and control processes Far Eastern Branch of RAS, 690041, Vladivostok, Russia

Date received: 28.08.14

This work describes the synthesis method for the system of automatic correction of linear displacements of the underwater vehicles. Often in the process of movement of an underwater vehicle the angles of roll and trim appear under the influence of torque impacts by grasped cargo, underwater cable, vehicle asymmetry and other perturbing factors. In some cases it is impossible to compensate for the unwanted angular underwater vehicle displacements with the help of thrust created by its propulsors. Uncontrollable changes in the spatial orientation of an underwater vehicle misroute it from the given direction. As a result, there is a problem of an accurate vehicle movement in a given direction even, notwithstanding the uncontrollable angles of roll and trim.

In presence of the external forces and torques of the arbitrary non-zero values of the angles of roll and trim the proposed system automatically changes the corresponding propulsors' thrusts depending on the current values of the said angles. It ensures a high-accuracy underwater vehicle movement in a direction. Besides, the developed system allows us to eliminate the underwater vehicle's displacement from a given spatial trajectory, caused by the asymmetry of the vehicle and different values of the added mass of fluid and viscous friction coefficient when the underwater vehicle moves with different degrees of freedom.

As a result of using the proposed correction, an operator can control the desired torque vector of an underwater vehicle without considering the appearance of the arbitrary roll and trim angles. The results of the performed numerical simulations proved high efficiency of the synthesized complex control system, which has simple practical implementation and does not require installation of additional equipment and navigation systems for the underwater vehicles.

Keywords: underwater vehicle, control system, automatic correction, linear displacements, Doppler log

For citation:

Filaretov V. F., Konoplin A. Yu., Konoplin N. Yu. Method of Synthesis of Automatic Correction Systems of the Linear Displacements of

the Underwater Vehicles, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 204—209.

DOI: 10.17587/mau.16.204-209

References

1. **Filaretov V. F., Alekscev Yu. K., Lebedev A. V.** *Sistemy upravleniya podvodnymi robotami* (Control systems for underwater robots), Moscow, Kruglyi god, 2001, 288 p. (in Russian).
2. **Filaretov V. F., Lebedev A. V., Yukhimets D. A.** *Ustroistva i sistemy upravleniya podvodnykh robotov* (Devices and control systems of underwater robots), Moscow, Nauka, 2005, 270 p. (in Russian).
3. **Fossen T. I.** Guidance and control of ocean vehicles, John Wiley & Sons Ltd., 1994, 494 p.
4. **Filaretov V. F., Konoplin A. Yu.** System of automatic stabilization of underwater vehicle in stationkeeping regime with working multilink manipulator. Part 2, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 7, pp. 29–34 (in Russian).
5. **Fu K. S., Gonzalez R. C., Lee C. S. G.** Robotics: Control, sensing, vision and intelligence, McGraw-Hill, 1987, 580 p.

6. **Fridlender G. O., Kozlov M. S.** *Aviatsionnye giroskopicheskie pribory* (Aeronautical gyroscopic instruments), Moscow, Oborongiz, 1961, 390 p. (in Russian).
7. **Korn G., Korn T.** *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* (Mathematical Handbook for Scientists and Engineers), Moscow, 1973, 832 p. (in Russian).
8. **Vinogradov K. A., Koshkarev V. N., Osyukhin B. A., Khrebtov A. A.** *Absolyutnye i otnositel'nye lagi: Spravochnik* (Absolute and relative logs: Handbook), Leningrad, Sudostroenie, 1990, 264 p. (in Russian).

Corresponding author:

Filaretov Vladimir F., Doctor of Technical Science, Head of Laboratory Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of RAS, Radio str., 5690041, Vladivostok, Russian Federation; Tel. (office): (4232) 313783, Fax: (4232) 310452, e-mail: filaret@pma.ru

УДК 004: 656.61.073

В. М. Дорожко, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр., bendor@iacp.dvo.ru,
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

Динамическое воздействие "волны-убийцы" на контур морского судна

На основе метода вычислительной гидродинамики разработана технология моделирования динамического воздействия "волны-убийцы" на контур морского судна. Получены зависимости от времени скоростей и сил перемещения контура, угла, угловой скорости и ускорения, момента сил и момента импульса контура. Установлено, что контуры судов водоизмещением до 92 600 т опрокидываются "волнами-убийцами" высотой 30 м. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании морских судов, а также при разработке мероприятий по обеспечению безопасности судоходства.

Ключевые слова: "волна-убийца", вычислительная гидродинамика, контур судна, момент силы, момент импульса, угол крена, опрокидывание судна, безопасность судоходства

Введение

"Волны-убийцы" представляют особую опасность для морских судов. Высота таких волн может достигать 30 м, при этом они возникают внезапно как в штормовых условиях, так и при относительно тихой погоде [1]. Теоретическая оценка вероятности возникновения "волны-убийцы" [2] показывает, что она может возникнуть один раз в несколько десятков лет. Тем не менее, считается, что за период 1968–1994 гг. от действия "волн-убийц" погибли или получили повреждение 22 супертанкера [3]. В 2000...2003 гг. Европейским союзом был профинансирован проект "MaxWave" [4] по мониторингу поверхности мирового океана с помощью радарных спутников ERS-1 и ERS-2 Европейского космического агентства. Результаты исследований показали, что "волны-убийцы" возникают чаще [5], чем предсказывается теорией. Например, за период 2006...2010 гг. было зарегистрировано 78 случаев возникновения аномальных волн [6]. Воздействие "волны-убийцы" (далее — аномальная волна) на морское судно может проявиться как в опрокидывании, так и нарушении целостности его конструкции за счет возникновения больших давлений в местах удара указанной волны [7]. Если нарушения целостности можно

предупредить путем проектирования более прочных судов, то избежать опрокидывания судов при встрече с аномальной волной не представляется возможным из-за внезапности возникновения волны и кратковременности подобной встречи. Все это предопределяет актуальность изучения воздействия аномальных волн на морские суда.

Опрокидывание морского судна в результате воздействия аномальной волны представляет собой особый случай движения судна на волнении. Нелинейность процесса движения столь существенна, что даже в рамках теории потенциального движения невязкой жидкости учет конечности амплитуд и скоростей качки приводит к сложным нелинейным граничным условиям [8]. Сложность достаточно строгого подхода к определению гидродинамических сил в задаче об опрокидывании судна заставляет обращаться к экспериментальным или вычислительным методам исследований. В качестве примера можно привести ряд исследований воздействия аномальных волн на морские суда, в которых выполнен анализ фактического материала морских происшествий [9, 10], представлен обзор экспериментальных и численных методов изучения опрокидывания судов в экстремальных условиях [11], выполнены экспериментальные исследования в

бассейне воздействия аномальной волны на модельное судно [12]. Следует отметить наличие большого числа работ по численному моделированию как самих аномальных волн, например [13, 14], так и их воздействия на препятствия [15, 16]. Недостатком большинства указанных работ является проведение исследований в модельных масштабах.

В задачах исследования гидродинамики судов широко применяется метод плоских сечений, при использовании которого результаты численного моделирования для удлиненных тел (морских судов) хорошо согласуются с результатами эксперимента [8]. В связи с этим в данной работе ставится задача численного исследования воздействия аномальной волны максимальной высоты 30 м на полноразмерное плоское поперечное сечение (контур), проходящее через центр морского судна, в целях получения количественных оценок параметров движения контура. Выбор контура в данной задаче соответствует наиболее опасному положению судна — параллельно гребню волны.

Метод решения задачи исследования

Решение поставленной задачи выполнено методом вычислительной гидродинамики (CFD — computational fluid dynamics), позволяющим реализовать виртуальный гидродинамический бассейн, в котором осуществляется формирование аномальной волны и ее воздействие на контур судна. В основу CFD-метода положены уравнения неразрывности несжимаемой жидкости и сохранения импульса (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, RANSE) [17], которые могут быть записаны в тензорном виде следующим образом:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = \\ & = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right] + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j}), \quad (2) \end{aligned}$$

где $\{i, j\} = 1, 2, 3$; x_1, x_2, x_3 — декартовы координаты в абсолютной системе $ox_1x_2x_3$ и соответствующие им u_1, u_2, u_3 — осредненные значения абсолютной скорости потока жидкости, а также u'_1, u'_2, u'_3 — флуктуации абсолютной скорости; μ и ρ — вязкость и плотность жидкости соответственно; t — время; p — давление; $\rho \overline{u'_i u'_j}$ — напряжение Рейнольдса. Для вычисления напряжения Рейнольдса применена модель турбулентности $k_t - \varepsilon_t$ (renormalization group mathematical technique, RNG) [18], которая позволяет получать расчетные значения гидродинамических полей, близкие к их экспериментальным значениям [19]. В связи с этим уравнения (1), (2) дополнены уравнениями [18] переноса турбулент-

ной кинетической энергии (k_t) и скорости ее диссипации (ε_t).

Применительно к настоящей задаче процесс зарождения и развития аномальной волны можно условно представить в виде трех этапов [20]. *Первый этап*: случайная пространственно-временная фокусировка [21] спектра компонентов морского волнения, в результате которой формируется группа волн. Для перехода ко второму этапу требуется выполнение условия достаточности крутизны волн в группе ($S = \pi H/\lambda > 0,443$, где H и λ — максимальная высота и средняя длина волн) [22]. *Второй этап*: внутреннее нелинейное преобразование группы волн до аномальных высот 30 м [2]. На втором этапе аномальная волна воздействует на контур, свободно плавающий на поверхности воды. *Третий этап*: обрушение аномальной волны. В соответствии с поставленной задачей в данной работе CFD-методом моделируются второй и третий этапы.

Численное решение системы уравнений (1), (2) выполнено в расчетной области, представляющей собой виртуальный бассейн, имеющий форму прямоугольника, сформированного в вертикальной плоскости в системе координат oxy , ось ox которой лежит на условной поверхности спокойной воды (при отсутствии волн), а ось oy направлена вверх и совпадает с левой границей расчетной области. Пространство расчетной области разбито квадратными сеточными элементами, за исключением прямоугольной области, охватывающей пространство движения контура, которое разбито треугольными сеточными элементами, перестраиваемыми в процессе движения контура под воздействием аномальной волны.

Натурные наблюдения [23] свидетельствуют, что аномальные волны имеют вид группы волн, под огибающей которых может находиться несколько периодов волн. Анализ формы наиболее часто встречающихся аномальных волн с тремя периодами указывает на их сходство с вейвлетом Морле [24]. В связи с этим на поверхности воды в расчетной области виртуального бассейна создавалась бегущая волна, начальная (при $t = 0$) форма которой соответствует вещественной компоненте комплексного вейвлета Морле. Отклонение поверхности такой аномальной волны от уровня спокойной воды описывается выражением

$$\zeta = A_b \exp \left[-2 \left(\frac{k_b(x - x_c)}{2\pi} \right)^2 \right] \cos[k_b(x - x_c) - \sigma_b t], \quad (3)$$

где A_b — начальная амплитуда аномальной волны; $k_b = 2\pi/\lambda_b$, $\sigma_b = \sqrt{gk_b}$, λ_b и x_c — волновое число, угловая частота, длина центральной волны и координата начального положения максимума аномальной волны соответственно.

CFD-метод предполагает пространственную дискретизацию всех переменных, в том числе и пространственного профиля ζ с шагом d , равным размеру стороны сеточного элемента. Применение дискретного преобразования Фурье [25] к массиву дискретных значений указанного профиля позво-

лило получить пространственный спектр в виде массива комплексных спектральных амплитуд

$$Y_n = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{2}{N} \zeta(i+1) \exp(-j2\pi ni/N), \quad n = \overline{1, N}, \quad \text{где } N$$

и i — число дискретных значений и номер элемента в массиве дискретных значений профиля ζ , $j = \sqrt{-1}$, n — порядковый номер комплексной спектральной амплитуды Y_n .

Для формирования в расчетной области поля скорости аномальной волны использовалось усечение боковых составляющих спектра комплексных амплитуд, модуль которых не превышал амплитудный порог, равный $0,1 \cdot \max(|Y_n|)$. В силу симметрии спектра центральная спектральная амплитуда имеет максимальную высоту и характеризуется центральной длиной волны спектра. Граничное условие на входе (левая граница) расчетной области для системы уравнений (1) и (2) принимает вид вектора скорости жидкости, горизонтальная (v_x) и вертикальная (v_y) компоненты которого определяются следующими выражениями:

$$v_x = \sum_{n=m}^M \frac{gk_n |Y_n|}{\sigma_n} \exp(k_n y) \cos(k_n x_0 - \sigma_n t + \varphi_n), \quad (4)$$

$$v_y = \sum_{n=m}^M \frac{gk_n |Y_n|}{\sigma_n} \exp(k_n y) \sin(k_n x_0 - \sigma_n t + \varphi_n), \quad (5)$$

где m и M — номера комплексных амплитуд левой и правой границ усеченного спектра; g — ускорение свободного падения; $k_n = 2\pi/\lambda_n$; $\sigma_n = \sqrt{gk_n}$; x_0 — координата входной границы; φ_n — начальная фаза n -й составляющей спектра. Граничное условие на выходе (правая граница) расчетной области выполнено с помощью введения дополнительного затухания, исключающего отражение бегущих волн спектра от границы. Граничное условие на дне виртуального бассейна соответствует твердому телу — нулевой нормальной производной скорости жидкости, а на верхней границе — атмосферному давлению. Граничные условия на поверхности свободно плавающего контура соответствуют условию твердого тела. Воздействие аномальной волны на контур и его движение представляют собой нестационарный процесс. В связи с этим кроме пространственной (сеточной) дискретизации численное решение предусматривает и временную дискретизацию процессов. В соответствии с моделью DOF (degrees of freedom) [26] на каждом временном шаге дискретизации вычисляются векторы силы и момента сил, приложенные к центру тяжести свободно плавающего контура. Указанные векторы являются основанием для вычисления векторов линейных и угловых перемещений и соответствующих им скоростей и ускорений контура. Граничное условие на свободной поверхности воды вычислялось в соответствии с моделью VOF (volume of fluid) [27]. В начальный момент времени свободно плавающий контур уста-

навливался на поверхности воды с таким расчетом, чтобы его положение в дальнейшем совпало с x -координатой второго максимума высоты аномальной волны (далее будут приведены пояснения о числе максимумов высоты в процессе нелинейного преобразования аномальной волны). Такое начальное расположение контура придает ему наибольшую динамичность.

Начальные условия уравнений (1), (2) сформированы путем инициализации расчетной области от вектора скорости (4), (5), в результате чего во всем расчетном пространстве виртуального бассейна создавалось распределение амплитуд и скоростей жидкости и воздуха, соответствующее начальному ($t = 0$) состоянию (3) бегущей аномальной волны.

Численное моделирование воздействия аномальных волн на контур морского судна, прикладная интерпретация и обсуждение результатов

Для численного моделирования сформировано расчетное пространство в виде прямоугольника длиной 1000 м и высотой 300 м. Расчетное пространство разбито квадратными сеточными элементами со стороной 0,5 м, за исключением прямоугольной области длиной 200 м и высотой 50 м, охватывающей пространство движения контура, которое разбито равнобедренными треугольными сеточными элементами со стороной 0,5 м. Данное расчетное пространство представляет собой виртуальный 2D-бассейн, глубина воды в котором составляет 250 м, что обеспечивает условие глубокой воды (глубина превышает половину самой длинной волны [2] усеченного спектра Y_n). Плотность воды принята равной $\rho = 1027 \text{ кг/м}^3$, ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. Шаг дискретизации времени (Δt) нестационарного решателя выбран равным 0,0005 с, при котором максимальное число Куранта ($C = \Delta t \cdot v_{\max}/d$, где $v_{\max}$ — максимальное значение скорости жидкости, d — сторона сеточной ячейки) не превышало 0,25.

Вычисление начальных (в момент $t = 0$) значений амплитуд и длин волн, обеспечивающих в процессе внутреннего нелинейного преобразования аномальных волн возрастание их высот до значений 30 м, выполнено в два этапа. На первом этапе проведено численное исследование нелинейного преобразования волн (3) при базовой длине (λ_b) центральных волн спектра, равной 100 м, и нескольких начальных амплитудах (A_b): 8, 9, 10, 11 и 12 м. Выбор крайних значений амплитуд 8 и 12 м обусловлен тем, что второй максимум высоты базовой волны с начальной амплитудой менее 8 м имеет незначительную крутизну (менее 0,496). В процессе нелинейного преобразования базовой волны с амплитудой более 12 м (крутизна более 0,785) оба ее максимума высоты (первый и второй) смыкаются, что приводит к стремительному уменьшению их высоты. В связи с этим для изучения воздействия аномальных волн на контур морского судна выбраны волны, крутизна которых лежит в диапазоне 0,496...0,785,

так как аномальные волны вне указанного диапазона не представляют опасности для морских судов по указанным выше причинам. В процессе нелинейного преобразования для каждой начальной амплитуды базовых волн вычислены соответствующие значения высоты (H_b) второго максимума. На втором этапе из выражения $m = 30/H_b$ определены масштабирующие коэффициенты (m) для каждой из базовых волн. Применение указанных масштабирующих коэффициентов одновременно к начальным амплитудам A_b и длине λ_b центральных волн, позволило получить ряд аномальных волн с одинаковой высотой ($H_m = mH_b$) 30 м второго максимума высоты и длинами центральных волн ($\lambda_m = m\lambda_b$),

Водоизмещение судов и размеры их контуров

Водоизмещение судов, т	Параметры контуров			
	Ширина, м	Высота, м	Осадка, м	Ширина/высота
1120	9,3	5,0	4,15	1,86
3040	13,5	8,9	6,25	1,52
4947	15,9	10,0	5,66	1,59
7160	17,4	8,8	5,60	1,98
9260	19,0	12,2	6,60	1,56

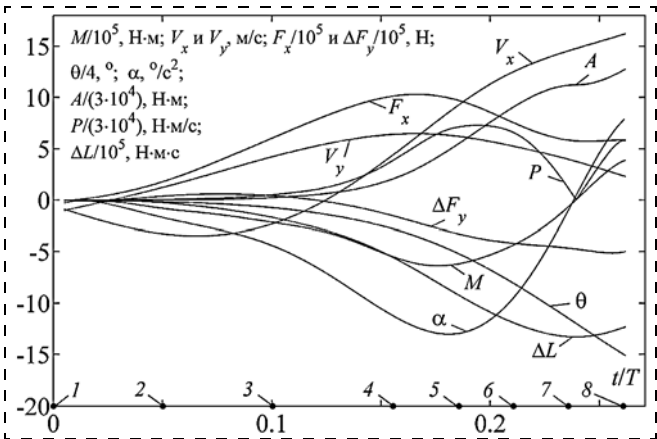


Рис. 1. Изменение параметров движения контура в процессе воздействия аномальной волны

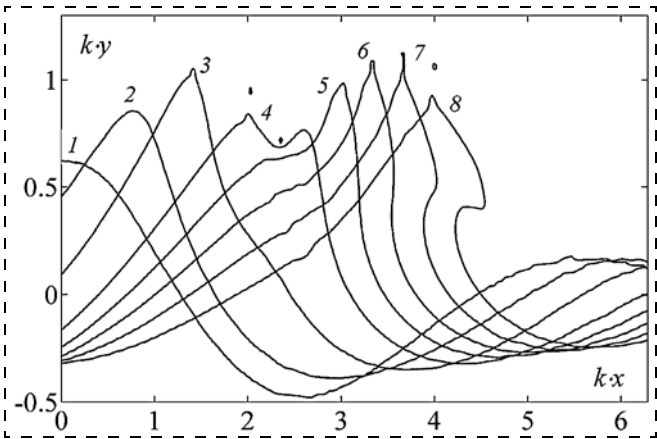


Рис. 2. Последовательность профилей аномальной волны, отражающая процесс ее внутреннего нелинейного преобразования, x и y — координаты волны в системе oxu

лежащими в диапазоне 120...190 м. Следует отметить, что масштабирование обусловило совпадение профилей базовых волн и соответствующих им масштабированных аномальных волн одинаковой крутизны, что обеспечило сохранение выбранного диапазона значений крутизны. В результате центральные длины (λ_m) масштабированных аномальных волн с высотой второго максимума, равной 30 м, составили массив (120, 130, 140, 155, 190) м, а их крутизна ($S = 30\pi/\lambda_m$) — массив (0,785; 0,725; 0,673; 0,608; 0,496) соответственно.

В качестве объектов воздействия аномальных волн выбраны контуры рыбопромысловых судов [28] (см. таблицу), для которых характерно длительное пребывание в море, что увеличивает вероятность их встречи с аномальной волной.

Численное моделирование показало, что движение контуров под воздействием аномальных волн имеет типичные признаки, которые рассмотрим на примере движения контура судна водоизмещением 4947 т (среднее значение водоизмещения выбранного ряда судов) под воздействием аномальной волны с центральной длиной 155 м (середина выбранного диапазона длин волн). Количественные оценки параметров движения контура от начала до опрокидывания представлены на рис. 1—3, на которых выполнена сквозная нумерация (1, ..., 8) диаграмм, относящаяся к соответствующим моментам нормированного времени t/T (см. рис. 1), где $T = 9,964$ с — период времени аномальной волны.

Процесс изменения положения и угла крена контура (рис. 3) рассматривается синхронно с диаграммами на рис. 1. Для наглядности процесса нелинейного преобразования приводится последовательность профилей аномальной волны без контура (см. рис. 2).

На рис. 1 представлены зависимости от нормированного времени (t/T) момента сил (M) относительно центра тяжести контура; горизонтальной (F_x) и вертикальной (ΔF_y — отклонение от сил плавучести контура) компонент вектора силы; горизонтальной (V_x) и вертикальной (V_y) компонент вектора скорости движения контура; угла крена (θ), скорости (ω) и ускорения (α) угла крена контура;

работы ($A(t/T) = \int_0^{\theta(t/T)} M d\theta$) и мощности ($P(t/T) =$

$= \int_0^{\omega(t/T)} M d\omega$) момента сил; приращения момента

импульса ($\Delta L = \int_0^{t/T} (M dt)/T$) [29] в процессе воз-

действия аномальной волны на контур.

Начальное состояние численной модели соответствует номеру 1 нормированного времени (t/T) на рис. 1—3. Первые признаки нелинейного преобразования волны выражаются в искажении геометрии профиля ее гребня (2 на рис. 2, 3). Процесс

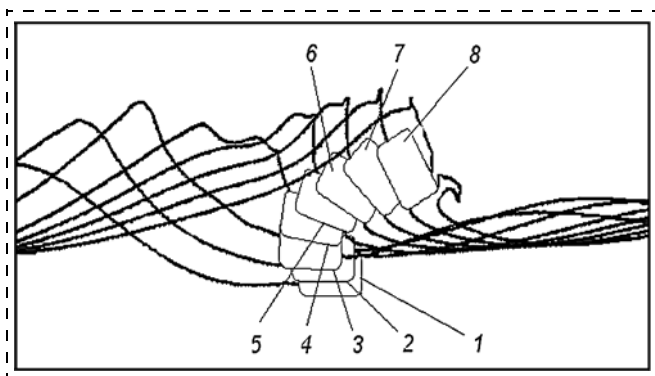


Рис. 3. Подъем, смещение и опрокидывание контура под воздействием аномальной волны

формирования первого максимума высоты аномальной волны завершается в момент 3 (рис. 2, 3). Этому моменту времени соответствует начало роста модуля всех параметров (см. рис. 1) движения контура и появления первых признаков крена (рис. 3), обусловленного встречей контура с фронтом аномальной волны. Диаграммы 4 характеризуют промежуточное состояние, для которого характерно резкое снижение высоты аномальной волны и формирование профиля гребня седловидной формы (4 на рис. 2, 3). Тем не менее, за счет приобретенной энергии от первого максимума аномальной волны движение контура на интервале 3—4 нормированного времени характеризуется ростом значений горизонтальной и вертикальной компонент сил (F_x и ΔF_y на рис. 1), приложенных к центру тяжести контура и, соответственно, увеличением скоростей горизонтального смещения (V_x) и вертикального подъема (V_y) контура. Существенно увеличиваются момент сил (M), работа (A) и мощность момента сил (P), а также приращение момента импульса (ΔL).

Вследствие указанных процессов наблюдается рост крена и углового ускорения (θ и α) контура, вследствие чего он заметно накренился и поднялся на волне (4 на рис. 3). В процессе последующих нелинейных преобразований рост высоты аномальной волны (см. рис. 2, 3) в момент времени 5 приобретает максимальное ускорение, что приводит к резкому увеличению крена (θ) и подъему контура (5 на рис. 1, 3). Для этого момента времени характерно формирование максимумов (см. рис. 1) момента (M) сил, углового ускорения (α), мощности момента сил (P), вертикальной скорости (V_y) и горизонтальной силы (F_x). В момент времени 6 завершается формирование второго максимума высоты аномальной волны (см. рис. 2, 3). При этом аномальная волна, вектор скорости жидкости которой приобрел горизонтальную направленность, накрывает левую половину контура (6 на рис. 3) и, увлекая, стремительно увеличивает его крен (см. рис. 1 и 3) и горизонтальную скорость (V_x).

В момент времени 6 в связи с прекращением роста высоты аномальной волны отмечается сниже-

ние значений момента сил M и углового ускорения α . Работа A момента сил и приращение момента импульса ΔL , в связи с их интегральным характером, сохраняют тенденцию к увеличению. С момента 7 (см. рис. 1—3) нормированного времени начинается процесс разрушения аномальной волны. Максимальное значение скорости воды (22 м/с) в зоне, располагающейся на середине высоты фронта волны (см. рис. 2), превосходит скорость движения самой волны (15 м/с), что обуславливает начало формирования выброса из указанной зоны (7, 8) струи воды, именуемой ныряющим буруном. За счет совпадения зоны формирования ныряющего буруна и положения контура (7, 8 на рис. 3) увеличиваются скорость горизонтального смещения и крен контура, вплоть до его опрокидывания (порог опрокидывания — $\theta \geq 60^\circ$ [30]). Этим объясняется выбор начального положения контура, совпадающего с x -координатой второго максимума высоты аномальной волны, что позволило реализовать максимальное динамическое воздействие аномальной волны на контур.

Таким образом, в процессе последовательного формирования двух максимумов высоты аномальной волны с образованием ныряющего буруна происходит увеличение крутизны волны, значение которой перед ее обрушением достигает значения 2,5, вследствие этого движение контура характеризуется одновременным подъемом, смещением с нарастающей скоростью и увеличением крена вплоть до опрокидывания.

На рис. 4 представлены результаты вычисления угла крена контуров различных судов под действием аномальной волны. Из диаграмм следует, что все контуры достигли состояния опрокидывания ($\theta = 60^\circ$). По мере роста водоизмещения увеличивалось время опрокидывания. Исключением является задержка опрокидывания контура судна меньшего водоизмещения (7160 т) относительно судна большего водоизмещения (9260 т), обусловленная лучшей устойчивостью контура за счет увеличен-

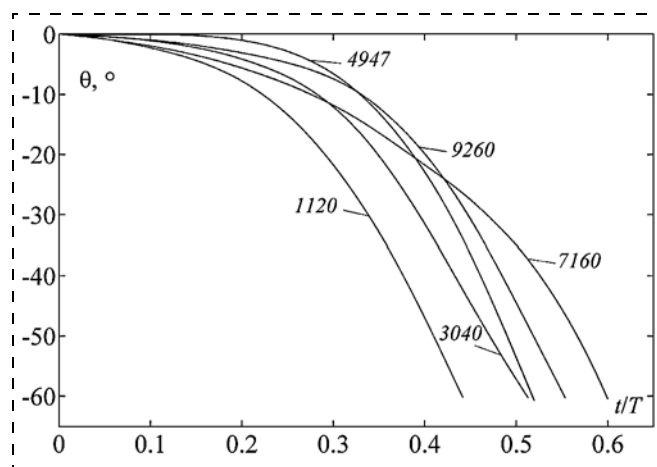


Рис. 4. Изменение угла крена контуров в процессе воздействия аномальной волны высотой 30 м и длиной центральной волны спектра 155 м. Параметр диаграмм — водоизмещение судов, к которым относятся контуры

ного значения отношения (1,98) его ширины к высоте (см. таблицу).

Интегральной величиной, характеризующей итоговое значение воздействия внешних сил, в данном случае — аномальной волны на контур, является

момент импульса $L = \int_0^{\tau} M dt$, где τ — финальный мо-

мент времени, соответствующий опрокидыванию судна. На рис. 5 представлены результаты вычисления момента импульса контуров от опрокидывающего воздействия аномальных волн крутизной от 0,496 до 0,785, которым соответствуют волны с максимальной высотой 30 м и длинами центральных волн в диапазоне 120...190 м. Результаты вычислений показывают, что указанные аномальные волны опрокидывают суда всех контуров водоизмещением от 1120 до 9260 т. При этом с ростом крутизны волны или водоизмещения судна, которому принадлежит контур, увеличивается опрокидывающее значение момента импульса, развиваемое аномальной волной, что указывает на большую опасность крутых аномальных волн даже для больших судов.

Отмечающееся снижение моментов импульса (рис. 5) для волн крутизной 0,785 обусловлено отсутствием у них процесса формирования ныряющего буруна в связи с тем, что волны подобной крутизны имеют тенденцию к смыканию обоих максимумов высоты (первого и второго), что приводит к стремительному уменьшению их высоты. Тем не менее, уменьшенные значения моментов импульса достаточны для опрокидывания контуров. Из сравнения параметров контуров судов водоизмещением 3040 и 7160 т следует, что при равной высоте соотношение ширины их контуров составляет 1,3 (см. таблицу), а максимальных значений моментов импульса — 2,4 (рис. 5). Это свидетельствует о повышении сопротивляемости (устойчивости) к опрокидыванию контура с увеличением его

ширины. Из этого также следует, что опрокидывающий момент импульса для контуров, полученных в результате поперечного сечения вне центральной части, будет меньше, так как контуры в носовой или кормовой частях судна сужаются. Следовательно, оценки для контуров, полученные в настоящей работе для поперечных сечений, проходящих через центр судов, и распространенные на всю длину судов, можно рассматривать как оптимистические в отношении устойчивости судов к опрокидывающему действию аномальной волной.

Данные о максимальном (δ на рис. 1) значении работы A могут использоваться для оценки устойчивости аналогичных судов по диаграммам статической остойчивости [8] без проведения исследований на воздействие аномальных волн. Вычисленные значения момента импульса (рис. 5), осредненные ко времени опрокидывания $((0,45...0,60)T$, где $T = \sqrt{2\pi\lambda_m/g}$ — период аномальной волны), могут использоваться для вычисления средних опрокидывающих моментов контуров судов, используемых при оценке устойчивости судов [8]. Увеличение ширины судна при неизменной высоте борта ведет к увеличению устойчивости судна (см. рис. 4, 5) к опрокидывающему воздействию аномальной волны, что может быть учтено при проектировании, например, рыбопромысловых судов, для которых характерно длительное пребывание в море, в том числе и в штормовых условиях.

Заключение

Задача, поставленная в данной работе, решена: выполнены численные исследования воздействия аномальной волны максимальной высоты 30 м на контуры полноразмерных морских судов и получены количественные оценки параметров их движения. Следует отметить эффективность разработанной технологии, которая позволила получить количественные оценки воздействия аномальных волн на контуры судов различных водоизмещений. Установлено, что аномальные волны высотой 30 м и крутизной от 0,725 до 0,760 развивают наибольшее значение опрокидывающего момента импульса ($3,8 \cdot 10^6$ Н·м·с) на контуре судна с максимальным водоизмещением 9 260 т, что соответствует среднему опрокидывающему моменту, равному $7,3 \cdot 10^5$ Н·м, или вертикальной силе в 9,4 т, приложенной в течение 0,55 T к краю контура. В целом результаты исследований свидетельствуют о том, что контуры судов, соответственно и судна водоизмещением до 9260 т, расположенные бортом к волне, не могут противостоять опрокидывающему действию аномальных волн высотой 30 м. Время опрокидывания в среднем составляет половину периода аномальной волны, это исключает возможность уклонения судна от встречи с аномальной волной. В связи с этим судоводителю в зонах с повышенной частотой регистрации аномальных волн следует избегать плавания параллельно гребню волн даже в условиях

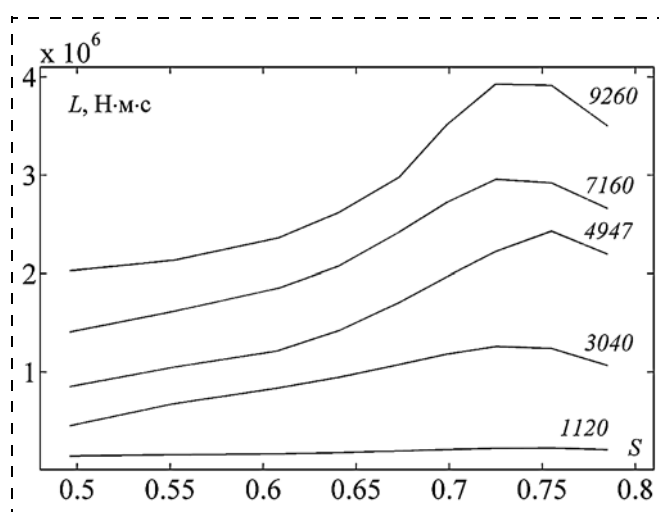


Рис. 5. Зависимость от крутизны аномальных волн значения момента импульса, приводящего к опрокидыванию контуров. Параметр диаграмм — водоизмещение судов, к которым относятся контуры

слабого волнения. Для разработки мероприятий по повышению безопасности мореплавания можно рекомендовать использование опубликованных данных о географическом распределении частоты регистрации аномальных волн.

Список литературы

1. **Didenkulova I. I., Slunyaev A. V., Pelinovsky E. N.** and et al. Freak waves in 2005 // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2006. V. 6. P. 1007—1015.
2. **Куркин А. А., Пелиновский Е. Н.** "Волны-убийцы": факты, теория и моделирование. Н. Новгород: ННГТУ, 2004. 158 с.
3. **Lawton G.** Monsters of the deep (The Perfect Wave) // *New Scientist*. 2001. V. 170, N. 2297. P. 28—32.
4. **Rogue waves — forecast and impact on marine structures** [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.kuleuven.be/hydr/downloads/MaxWave.pdf>
5. **Liu P. C., Pinho U. F.** Freak waves — more frequent than rare! // *Annales Geophys.* 2004. V. 22. P. 1839—1842.
6. **Nikolkina L., Didenkulova I.** Rogue waves in 2006—2010. // *Natural hazards and Earth system sciences*. 2011. V. 11. P. 2913—2924.
7. **Waseda T., Kinoshita T.** Freak waves and capsizing accidents // *Proceedings of the 11-th International Ship Stability Workshop (ISSW2010)*. Netherlands, 2010. P. 79—84.
8. **Справочник по теории корабля** / Под ред. Я. И. Вайткурского. В 3 тт. Т. 2. Статика судов, качка судов. Л.: Судостроение, 1985. 440 p.
9. **Kjeldsen P. A.** Sudden Disaster — in *Extreme waves*. // *Rogue Waves 2000: Proceedings of a Workshop in Brest, France*, 29—30 November, 2000. P. 19—35.
10. **Smith C. B.** Extreme waves and ship design // *10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures* Houston, Texas, 2007.
11. **De Kat J. O., Paulling J. R.** Prediction of extreme motions and capsizing of ships and offshore marine vehicles // *Proceedings of OMAE 2001: The 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Rio de Janeiro, Brazil, 3—8 June, 2001. P. 817—828.
12. **Minami M., Sawada H., Tanizawa K.** Study of ship responses and wave loads in the freak wave // *Proceedings Of The Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. San Francisco, California, USA. May 28 — June 2, 2006. P. 272—278.
13. **Sergeeva A., Slunyaev A., Pelinovsky E.** and et al. Numerical modeling of rogue waves in coastal waters // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2014. V. 14. P. 861—870.
14. **Clauss G. F., Schmittner C. E., Stuck R.** Numerical wave tank — simulation of extreme waves for the investigation of structural

responses // *Proceedings of OMAE 2005, 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Halkidiki, Greece. June 12—17, 2005. P. 785—789.

15. **Clauss G. F., Schmittner C. E., Hennig J.** Simulation of rogue waves and their impact on marine structures // *Proceedings of MAXWAVE, Final meeting*. Geneva, Switzerland. October 8—10, 2003. P. 1—10.

16. **Дорожко В. М.** Динамическое воздействие аномально большой волны на неподвижную преграду // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2013, № 9. С 59—64.

17. **Blazek J.** *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Elsevier, 2001. — 440 p.

18. **Yakhot V., Orszag S. A.** Renormalization group analysis of turbulence: Basic theory // *Journal of scientific computing*. 1986. V. 1, N. 1. P. 1—51.

19. **Hsu K. L., Chen Y. J., Chau S. W.** and et al. Ship flow computation of DTMB 5415 // *CFD workshop Tokyo, Japan*. March 9—11, 2005.

20. **Ruban V., Kodama Y., Ruderman M.** and et al. Rogue waves — towards a unifying concept: Discussions and debates // *The European physical journal special topics*. 2010. Issue 185. P. 5—15.

21. **Zakharov V. E., Shabat A. B.** Exact theory of two-dimensional self-focusing and onedimensional self-modulation of waves in nonlinear media // *Soviet physics. Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1972. N. 1. P. 62—69.

22. **Longuet-Higgins M. S.** The asymptotic behavior of the coefficients in Stokes's series for surface gravity waves // *Journal of applied mathematics*. 1985. V. 34. P. 269—277.

23. **Fonseca N., Soares C., Pascoal R.** Structural loads induced in a containership by abnormal wave conditions // *Journ. Mar. Sci. Technol.* 2006. N. 11. P. 245—259.

24. **Дьяконов В. П.** Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002. 448 с.

25. **Сергиенко А. Б.** Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. 608 с.

26. **Колесник В. П.** Решения ANSYS-CFD в авиакосмических технологиях: динамические перестраиваемые сетки в расчетной аэродинамике // *АКТО-2008: Авиакосмические технологии и оборудование*. Казань-2008. IV Международная научно-практическая конференция. 12—15 августа 2008 года.

27. **Hirt C. W., Nichols B. D.** Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries // *J. Comput. Phys.* 1985. V. 39. P. 201—225.

28. **Флот** рыбной промышленности. Справочник типовых судов. М.: Транспорт. 381 с.

29. **Афонин А. М.** Физические основы механики. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 368 с.

30. **Правила** классификации и постройки морских судов. Т. 1. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2012. 466 с.

Dynamic Impact of Rogue Wave on a Seagoing Vessel Contour

V. M. Dorozhko, bendor@iacp.dvo.ru, Institute of Automation and Control Processes, Far East Branch, Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), 690041, Vladivostok, Russian Federation

Date received: 14.10.14

The article is devoted to the study of a numerical modeling of the impact of a rogue wave on a full-sized contour (middle-vessel cross section) in order to obtain the quantitative estimates of its motion parameters. The numerical simulation of rogue wave with the height of 30 meters and wavelength of 120—190 meters was fulfilled in a numerical wave tank with the length of 1000 meters and water depth of 250 meters, which was characterized by the following key features: a) Computational Fluid Dynamics theory; b) Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations using the Volume of Fluid method of the free surface and Three Degrees of Freedom method for describing the movement of the contour. Two maxima in the process of nonlinear transformation of a rogue wave were discovered. Free-floating contour was used to simulate a capsizing due to a rogue wave. Contour was mounted on the surface of the water in such a way that its position in the future would coincide with the x-coordinate of the second maximum of the rogue wave. The maximum of the water velocity in the area, located in the midst of the front, exceeded the velocity of the rogue wave. This caused the beginning of formation of a water jet from the specified zone named as plunging breaker. Simultaneous lifting, horizontal movement at high speed and capsizing of the contour were caused due to a huge steepness of the rogue wave front. The paper treats in detail the aspects associated with the numerical modeling of the contour capsize and estimation of the parameters of its motion. The time histories of the computed velocity of displacement, heeling angle, angle velocity and acceleration, forces, moment of impulse, power of heeling moment, heeling moment of the contour were calculated. The study indicates that the contours of the vessels of up to 9260 t cannot resist the heeling action of the rogue wave. Average capsizing time is half of the period of the rogue wave, which eliminates a chance for vessel's maneuver. Therefore, we can recommend the skippers to avoid swimming sideways to a wave even in calm sea conditions.

Keywords: rogue wave, computational fluid dynamics, contour of the vessel, moment of force, moment of impulse, heeling angle, capsizing of the vessel, safety of seagoing vessel

For citation:

Dorozhko V. M., Dynamic Impact of Rogue Wave on a Seagoing Vessel Contour, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 209–216.

DOI: 10.17587/mau.16.209-216

References

1. **Didenkulova I. I., Slunyaev A. V., Pelinovsky E. N.** and et al. Freak waves in 2005, *Nat Hazards Earth Syst. Sci.*, 2006, vol. 6, pp. 1007–1015.
2. **Kurkin A. A., Pelinovskiy E. N.** "Volny-ubiitsy": fakty, teoriya i modelirovanie (Freak-waves, theory and modeling), N.Novgorod, published by Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, 2004, 158 p. (in Russian).
3. **Lawton G.** Monsters of the deep (The Perfect Wave), *New Scientist*, 2001, vol. 170, no. 2297, pp. 28–32.
4. **Rogue waves** — forecast and impact on marine structures. Available at: <http://www.kuleuven.be/hydr/downloads/MaxWave.pdf>.
5. **Liu P. C., Pinho U. F.** Freak waves — more frequent than rare! *Annales Geophys.*, 2004, vol. 22, pp. 1839–1842.
6. **Nikolkina I., Didenkulova I.** Rogue waves in 2006–2010, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, vol. 11, pp. 2913–2924.
7. **Waseda T., Kinoshita T.** Freak waves and capsizing accidents, *Proceedings of the 11-th International Ship Stability Workshop (ISSW2010)*, Netherland, 2010, pp. 79–84.
8. **Voitkounski Y. I.** *Spravochnik po teorii korablya. T. 2. Statika sudov, kachka sudov* (Ship Theory Handbook. Vol. 2. Statics of Ship, Ship Motions), Leningrad, Sudostroenie, 1985, 440 p. (in Russian).
9. **Kjeldsen P. A.** Sudden Disaster — in Extreme waves, *Proceedings of a Workshop "Rogue waves"*, Brest, France, 2000, pp. 19–35.
10. **Smith C. B.** Extreme waves and ship design, *10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures*, Houston, Texas, 2007.
11. **De Kat J. O., Paulling J. R.** Prediction of extreme motions and capsizing of ships and offshore marine vehicles. *Proceedings of OMAE 2001: The 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil, 3–8 June, 2001, pp. 817–828.
12. **Minami M., Sawada H., Tanizawa K.** Study of ship responses and wave loads in the freak wave, *Proceedings Of The Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco, California, USA. May 28 — June 2, 2006, pp. 272–278.
13. **Sergeeva A., Slunyaev A., Pelinovsky E.** and et al. Numerical modeling of rogue waves in coastal waters, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2014, vol. 14, pp. 861–870.
14. **Clauss G. F., Schmittner C. E., Stuck R.** Numerical wave tank — simulation of extreme waves for the investigation of structural responses, *Proceedings of OMAE 2005, 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Halkidiki, Greece, June 12–17, 2005, pp. 785–789.
15. **Clauss G. F., Schmittner C. E., Hennig J.** Simulation of rogue waves and their impact on marine structures, *Proceedings of MAXWAVE, Final meeting*, Geneva, Switzerland, October 8–10, 2003, pp. 1–10.
16. **Dorozhko V. M.** *Dinamicheskoe Vozdeistvie Anomal'no Bolshoi Volny na Nepodvizhnuyu Pregradu* (Dynamic Load of the Extreme Wave on the Motionless Structure), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 9, pp. 59–64. (in Russian).
17. **Blazek J.** *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Elsevier, 2001, 440p.
18. **Yakhot V., Orszag S. A.** Renormalization group analysis of turbulence: Basic theory, *Journal of Scientific Computing*, 1986, vol. 1, no. 1, pp. 1–51.
19. **Hsu K. L., Chen Y. J., Chau S. W.** and et al. Ship flow computation of DTMB 5415, *CFD workshop*, Tokyo, Japan, March 9–11, 2005.
20. **Ruban V., Kodama Y., Ruderman M.** and et al. Rogue waves — towards a unifying concept: Discussions and debates, *The European Physical Journal Special Topics*, 2010, iss. 185, pp. 5–15.
21. **Zakharov V. E., Shabat A. B.** Exact theory of two-dimensional self-focusing and onedimensional self-modulation of waves in non-linear media, *Soviet physics. Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1972, no. 1, pp. 62–69.
22. **Longuet-Higgins M. S.** The asymptotic behavior of the coefficients in Stokes's series for surface gravity waves, *Journal of Applied Mathematics*, 1985, vol. 34, pp. 269–277.
23. **Fonseca N., Soares C., Pascoal R.** Structural loads induced in a containership by abnormal wave conditions, *Journ. Mar. Sci. Technol.*, 2006, no. 11, pp. 245–259.
24. **D'jakonov V. P.** *Veivlety. Ot teorii k praktike* (Wavelets. From the theory to practice), Moscow, SOLON-R, 2002, 448 p. (in Russian).
25. **Sergienko A. B.** *Tsifrovaya obrabotka signalov* (Digital Signal Processing), Saint Petersburg, Piter, 2002, 608 p. (in Russian).
26. **Kolesnik V. P.** *AKTO-2008: Aviacosmic technology and equipment. Kazan-2008. IV International Scientific and Practical Conference*, Kazan, 12–15 august 2008. (in Russian).
27. **Hirt C. W., Nichols B. D.** Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *J. Comput. Phys.*, 1985, vol. 39, pp. 201–225.
28. **Flot rybnoi promyshlennosti. Spravochnik tipovykh sudov (Fleet fishing industry. Handbook of model ships), Moscow, Transport, 2012, 381 p. (in Russian).**
29. **Afonin A. M.** *Fizicheskie osnovy mekhaniki* (Physical fundamentals of mechanics), Moscow, Izdatelstvo MGTU im. N. E. Bauman, 2006, 368 p. (in Russian).
30. **Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov (Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships), vol. 1. Saint Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2012, 466 p. (in Russian).**

Corresponding author:

Dorozhko Veniamin M., Senior Researcher, Institute of Automation and Control Processes, Far East Branch, Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), 690041, Vladivostok, Russian Federation, e-mail: bendor@iacp.dvo.ru

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Т. В. Пчелкина*.

Сдано в набор 29.12.2014. Подписано в печать 19.02.2015. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН315. 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.