ISSN 1684-6427 DOI 10.17587/issn.1684-6427 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

М ЕХАТРОНИКА, ВТОМАТИЗАЦИЯ, У ПРАВЛЕНИЕ









том 18 2017 Nº 3

Рисунки к статье В. М. Лохина, С. В. Манько, С. А. К. Диане, А. С. Панина, Р. И. Александровой «МЕХАНИЗМЫ САМООБУЧЕНИЯ В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ ГРУППИРОВКАХ ГО ЛЕСНА ОСНОВЕ ЭВОЛЮЦИОННОА ДЕРЕВЬЕВ КЛАССИФИКАЦИИ»



Рис. 3. Анализ данных с помощью метода построения леса деревьев классификации



Рис. 4. Организация процессов самообучения в многоагентных робототехнических группировках: интеллектуальная система управления автономного мобильного робота (*a*); механизмы самообучения в многоагентных робототехнических группировках на основе использования метода эволюционных лесов деревьев классификации (*б*)



Рис. 5. Моделирование целенаправленных перемещений автономных роботов со средствами самообучения и обмена знаниями о характеристиках проходимости различных участков местности при работе на общей территории

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЕХАТРОНИКА ОМАТИЗАЦИЯ, АВЛЕНИ

Том 18 2017 Nº 3

Издается с 2000 года

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Редакционный совет:

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

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с. н. с. Заместители гл. редактора:

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

Ответственный секретарь: БЕЗМЕНОВА М. Ю

Редакционная коллегия:

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

Релакния:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

ISSN 1684-6427

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Фуртат И.Б. Алгоритмы скользящей аппроксимации	и	7
--	---	---

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

эволюционного леса деревьев классификации	Лохин В. М., Манько С. В., Диане С. А. К., Панин А. С., Александрова Р. И. Mexa- низмы самообучения в мультиагентных робототехнических группировках на основе эволюционного леса деревьев классификации
Воробьев В. В. Алгоритмы выбора лидера и кластеризации в статическом рое роботов	Воробьев В. В. Алгоритмы выбора лидера и кластеризации в статическом рое роботов

Іавровский Э. К., Письменная Е. В. Управление ходьбой экзоскелета с использованием информации о программных моментах

ДИАГНОСТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Бошляков А. А., Ковалев В. В., Рубцов В. И. Автоматизация диагностики дефектов

Лютов А. Г., Ишкулова А. Р. Автоматизированная система экстремального управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с многосекционными

Бурьян Ю. А., Шалай В. В., Зубарев А. В., Поляков С. Н. Динамическая компенса-

УПРАВЛЕНИЕ В АВИАКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Панкратов В. М., Барулина М. А. Сравнительный анализ различных подходов к расчету собственных частот чувствительных элементов МЭМС-гироскопов 196

Аминев Б. Д., Данилова С.	К. Автоматизация	и управления движение	м морского
подводного объекта по зада	анному маршруту на	а основе имитационного	моделиро-
вания			202

Дорожко В. М. Энергия системы "контур морского судна — аномальная волна" 208

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

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

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL No. 3 MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLEN

Published since 2000

Editorial Council:

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

Editor-in-Chief:

FILIMONOV N. B., Russia, Moscow **Deputy Editor-in-Chief:**

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

Responsible Secretary: BEZMENOVA M. Yu., Russia, Moscow

Editorial Board:

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

Editorial Staff:

GRIGORIN-RYABOVA E.V., Russia, Moscow

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

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

CONTENTS

METHODS OF THE THEORY OF AUTOMATIC CONTROL

Furtat I. B	Moving Approximation Algorithms	147

ROBOTIC SYSTEMS

Lokhin V. M., Manko S. V., Diane S. A. K., Panin A. S., Alexandrova R. I. Self-Learning
Mechanisms in the Multi-robot Systems Based on the Evolution Forests and Classifica-
tion Trees
$\textbf{Vorobyov V. V.} \ \textbf{Leader Selection and Clusterization Algorithms in a Static Robot Swarm.} \ . \ 166$
Lavrovsky E. K., Pismennava E. V. Control of Walking for an Exoskeleton with the Use of

DIAGNOSIS AND MANAGEMENT AUTOMATION TECHNICAL OBJECTS AND TECHNOLOGICAL PROCESSES

Lutov A. G., Ishkulova A.	R. Au	utom	ate	d Sy	/sten	n th	еE	Extre	me	Μ	ulti	dir	ne	ns	ioi	nal	Ν	lar	nag	e-	
ment of Process Plating																					185

CONTROL IN AEROSPACE SYSTEMS

Pankratov V. M., Barulina M. A. A Comparative Analysis of Different Approaches to De- termination of the Natural Frequencies of the MEMS Gyros
Aminev B. D., Danilova S. K. Design Automation for Marine Underwater Object Route Control

Dorozhko V. M. Energy of the Sea Craft Contour — Anomalous Wave System. 208

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

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.51

DOI: 10.17587/mau.18.147-158

И. Б. Фуртат, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., проф., cainenash@mail.ru, Институт проблем машиноведения РАН, Университет ИТМО, Санкт-Петербург

Алгоритмы скользящей аппроксимации*

Представлены алгоритмы аппроксимации функций, которые имеют непрерывную и ограниченную производную первого или более порядка. Синтез алгоритмов основан на применении теоремы Лагранжа о среднем и ее обобщении. Для каждого алгоритма указаны время и ошибка аппроксимации. Приведены результаты моделирования, иллюстрирующие работоспособность предложенных схем.

Ключевые слова: скользящая аппроксимация, теорема Лагранжа о среднем, наблюдатель производных

Введение

В теории управления часто возникают задачи, связанные с аппроксимацией сигналов, которые соответствуют выходным переменным системы, внешним воздействиям или иным процессам. Нередко в таких задачах аппроксимацию необходимо осуществлять в реальном режиме времени. Именно такому классу алгоритмов посвящена данная статья.

В настоящее время предложено достаточно большое число алгоритмов аппроксимации, в основу которых заложены концепции о параметрической или непараметрической форме представления сигнала. Большая часть работ посвящена аппроксимации на базе параметрической формы представления сигнала [1—5], т. е. предполагается знание структуры генератора внешнего сигнала, иначе называемого внутренней моделью. Аппроксимация на базе непараметрической формы представления сигнала [6—10] основана на измерениях сигнала по его предшествующим значениям.

В классе аппроксимирующих алгоритмов, основанных на параметрической форме представления сигнала, отметим алгоритмы с дискретным временем [1] и алгоритмы с непрерывным временем [2—5]. Огромный пласт работ посвящен идентификации синусоидальных сигналов [1—5], где динамический порядок алгоритмов, точность аппроксимации и сложность расчета параметров аппроксимирующего синусоидального сигнала (в основном частот) зависит от числа синусоидальных функций в исходном сигнале.

В работах [9, 10] рассматриваются алгоритмы, основанные на непараметрической форме представ-

ления сигнала, полученные с применением теоремы Лагранжа о среднем и использующие конечное число скользящих измерений. Так, в статье [9] рассматривается дискретный алгоритм аппроксимации функций, которые имеют непрерывную и ограниченную производную *n*-го порядка, где n — это число конечных разностей в алгоритме аппроксимации. Для аналогичного класса функций, но с максимальным спектром возмущения, не превосходящим величины 1/2h (где h — время запаздывания в измерении сигнала), в статье [10] предложен алгоритм, позволяющий сократить время аппроксимации до 2h. Однако алгоритм, рассмотренный в работе [10], имеет ограничения на число измерений, которое зависит от времени запаздывания.

В данной статье предлагается развитие результатов работ [9, 10] для получения алгоритмов аппроксимации с непараметрической формой представления сигнала. Будем рассматривать скалярную функцию f(t), которая имеет непрерывную и ограниченную і-ю производную, где значение і зависит от способа решения и будет конкретно указано в статье. Предложено развитие обобщенной теоремы Лагранжа о среднем для разностей с постоянным и переменным шагом. Предложены алгоритмы скользящей аппроксимации на базе результатов второго раздела. Получены алгоритмы скользящей аппроксимации с частичной компенсацией ошибки аппроксимации. Приведены результаты моделирования, иллюстрирующие работоспособность предложенных схем аппроксимации.

1. Модификация теоремы Лагранжа о среднем

Рассмотрим функцию f(t), определенную на некотором промежутке Θ . Будем полагать, что все значения аргумента функции f, которые будут встречаться далее, принадлежат промежутку Θ . Зададим первую разность для f(t) в виде

$$\Delta^{1} f(t) = f(t) - f(t - k_{1}h), \qquad (1.1)$$

^{*} Результаты разделов 3 и 5 получены при поддержке гранта Президента Российской Федерации (договор № 14.W01.16.6325-МД (МД-6325.2016.8)). Результаты раздела 2 получены в ИПМаш РАН при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-29-00142). Другие исследования частично поддержаны грантом Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 14.Z50.31.0031) и грантом Правительства Российской Федерации (проект № 074-U01).

где $k_1 > 0$ и h > 0. Заметим, что выводы для h < 0будут аналогичными.

Вторую разность определим как

$$\Delta^2 f(t) = \Delta^1 f(t) - \Delta^1 f(t - k_2 h), \qquad (1.2)$$

где $k_2 > 0$. Определим *i*-ю разность в форме

$$\Delta^{i} f(t) = \Delta^{i-1} f(t) - \Delta^{i-1} f(t-k_{i}h), \qquad (1.3)$$

где $k_i > 0, i = \overline{3, n}$.

Сформулируем обобщенную теорему Лагранжа для разностей с переменным шагом.

Теорема 1. Φ ункцию f(t) на промежутке Θ можно представить в виде

$$f(t) = \sum_{i_1=1}^{n} f(t - k_{i_1}h) - \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_1, i_2=1\\i_1 \neq i_2}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2})h) + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, i_3=1\\i_1 \neq i_2 \neq i_3}}^{n} f(t - (k_{i_1} + k_{i_2} + k_{i_3})h) + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, i_3=1\\i_1 \neq i_2 \neq i_3}}^{n} f(t - (k_{i_1} + k_{i_2} + k_{i_3})h) + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n=1\\i_1 \neq i_2 \neq \dots \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2} + k_{i_3})h) + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n=1\\i_1 \neq i_2 \neq \dots \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2} + k_{i_3})h) + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n=1\\i_1 \neq i_2 \neq \dots \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2})h) + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n=1\\i_1 \neq i_2 \neq \dots \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2})h) + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n=1\\i_1 \neq i_2 \neq \dots \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2})h + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n=1\\i_1 \neq i_2 \neq \dots \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2})h + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n=1\\i_1 \neq i_2 \neq \dots \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2})h + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n=1\\i_1 \neq i_2 \neq \dots \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2})h + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n=1\\i_1 \neq i_2 \neq \dots \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2})h + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n=1\\i_1 \neq i_2 \neq \dots \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2})h + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n=1\\i_1 \neq i_2 \neq \dots \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2})h + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n=1\\i_1 \neq i_2 \neq \dots \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2})h + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n=1\\i_1 \neq i_2 \neq \dots \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2})h + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2})h + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2})h + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2})h + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2})h + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, \dots, i_n \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2})h + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, \dots, i_n \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2} + k_{i_2})h + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, \dots, i_n \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2} + k_{i_2})h + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, \dots, i_n \neq i_n}}^{n} f(t - k_{i_1} + k_{i_2} + k_{i_2})h + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1,$$

где $k_{i_i} \ge 1, j = 1, 2, ..., n.$

Г

Если f(t) имеет непрерывную и ограниченную производную первого порядка на промежутке Θ , то остаток R(t) определяется как

$$R(t) = k_{1}h \left[\dot{f}(t - \theta_{1}k_{1}h) - \sum_{i_{2}=2}^{n} \dot{f}(t - k_{i_{2}}h - \theta_{i_{2}}k_{1}h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_{2}, i_{3}=2\\i_{2}\neq i_{3}}}^{n} \dot{f}(t - (k_{i_{2}} + k_{i_{3}})h) - \theta_{i_{2}, i_{3}}k_{1}h) + \dots + \frac{(-1)^{n+1}}{(n-1)!} \sum_{\substack{i_{2}, i_{3}, \dots, i_{n}=2\\i_{2}\neq i_{3}\neq \dots \neq i_{n}}}^{n} \dot{f}(t - (k_{i_{2}} + k_{i_{3}} + \dots + k_{i_{n}})h) - \theta_{i_{2}, i_{3}, \dots, i_{n}}k_{1}h) \right]; \quad (1.5)$$

если f(t) имеет непрерывную и ограниченную производную п-го порядка на промежутке Θ , то остаток R(t) определяется как

$$R(t) = k_1^n h^n f^{(n)} \left(t - \vartheta h \sum_{i=1}^n k_i \right).$$
(1.6)

Здесь $\theta_{i_2}, \theta_{i_2, i_3}, ..., \theta_{i_2, i_3, ..., i_n}, \vartheta \in (0; 1), i_2, i_3, ...,$ $i_n = 2, 3, ..., n.$

Отметим, что $\theta_{ij} = \theta_{ji}$. Например, $\theta_{1,2} = \theta_{2,1}$, по-скольку $f(t - (k_{i_2} + k_{i_3})h) = f(t - (k_{i_3} + k_{i_2})h)$.

Доказательство. При доказательстве теоремы 1 воспользуемся теоремой Лагранжа о среднем. Перепишем первую разность (1.1) в виде

$$\Delta^{1} f(t) = k_{1} h \dot{f}(t - \theta_{1} k_{1} h).$$
(1.7)

С учетом выражения (1.1), перепишем вторую разность (1.2) как

$$\Delta^2 f(t) = f(t) - f(t - k_1 h) - [f(t - k_2 h) - f(t - (k_1 + k_2)h)].$$
(1.8)

Принимая во внимание соотношение (1.7), перепишем (1.8) в виде

$$\Delta^2 f(t) = k_1 h \dot{f}(t - \theta_1 k_1 h) - k_1 h \dot{f}(t - k_2 h - \theta_2 k_1 h) (1.9)$$

$$\Delta^2 f(t) = k_1^2 h^2 \ddot{f}(t - \vartheta_1(k_1 + k_2)h), \qquad (1.10)$$

где $0 < \vartheta_1 < 1$. Запишем третью разность как

$$\Delta^{3} f(t) = f(t) - f(t - k_{1}h) - [f(t - k_{2}h) - f(t - (k_{1} + k_{2})h)] - [f(t - k_{3}h) - f(t - (k_{1} + k_{3})h)] + [f(t - (k_{2} + k_{3})h) - f(t - (k_{1} + k_{2} + k_{3})h)].$$
(1.11)

Принимая во внимание соотношение (1.7) и (1.10), перепишем выражение (1.11) в виде

$$\Delta^{3} f(t) = k_{1} h [\dot{f}(t - \theta_{1} k_{1} h) - \dot{f}(t - k_{2} h - \theta_{2} k_{1} h) - \dot{f}(t - k_{3} h - \theta_{3} k_{1} h) + \dot{f}(t - (k_{2} + k_{3}) h - \theta_{2, 3} k_{1} h)],$$

или

$$\Delta^3 f(t) = k_1^3 h^3 \ddot{f} (t - \vartheta_2 (k_1 + k_2 + k_3)h),$$

где $0 < \vartheta_2 < 1$. По аналогии со второй и третьей разностью, запишем *n*-ю разность по формуле (1.3) в виде

$$\Delta^{n} f(t) = f(t) - \sum_{i_{1}=1}^{n} f(t - k_{i_{1}}h) + \\ + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_{1}, i_{2}=1\\i_{1} \neq i_{2}}}^{n} f(t - (k_{i_{1}} + k_{i_{2}})h) - \\ - \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_{1}, i_{2}, i_{3}=1\\i_{1} \neq i_{2} \neq i_{3}}}^{n} f(t - (k_{i_{1}} + k_{i_{2}} + k_{i_{3}})h) + \dots \\ + \frac{(-1)^{n}}{(n-1)!} \sum_{\substack{i_{1}, i_{2}, \dots, i_{n-1}=1\\i_{1} \neq i_{2} \neq \dots \neq i_{n-1}}}^{n} f(t - (k_{i_{1}} + k_{i_{2}} + \dots + k_{i_{n-1}})h) - \\ - \frac{(-1)^{n+1}}{n!} \sum_{\substack{i_{1}, i_{2}, \dots, i_{n}=1\\i_{2} \neq i_{3} \neq \dots \neq i_{n}}}^{n} f(t - (k_{i_{1}} + k_{i_{2}} + \dots + k_{i_{n}})h).(1.12)$$

Применяя теорему Лагранжа к формуле (1.12), получим результаты (1.4)—(1.6).

Следствие 1. При $k_1 = k_2 = ... = k_n = 1$ имеем обобщенную теорему Лагранжа о среднем [8, 9], где функция f(t), определенная на промежутке Θ , может быть представлена в виде

$$f(t) = \sum_{i=1}^{n} (-1)^{i-1} C_n^i f(t-ih) + R(t), \quad (1.13)$$

 $e\partial e \ C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}.$

Г

Если f(t) имеет непрерывную и ограниченную производную первого порядка на промежутке Θ , то остаток R(t) определяется как

$$R(t) = h \left[\dot{f}(t - \theta_1 h) - \sum_{\substack{i_2 = 2}}^{n} \dot{f}(t - h - \theta_{i_2} h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_2, i_3 = 2\\i_2 \neq i_3}}^{n} \dot{f}(t - 2h - \theta_{i_2, i_3} h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_2, i_3 = 2\\i_2 \neq i_3}}^{n} \dot{f}(t - 2h - \theta_{i_2, i_3} h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_2, i_3, \dots, i_n = 2\\i_2 \neq i_3 \neq \dots \neq i_n}}^{n} \dot{f}(t - 2h - \theta_{i_2, i_3} h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_2, i_3, \dots, i_n = 2\\i_2 \neq i_3 \neq \dots \neq i_n}}^{n} \dot{f}(t - 2h - \theta_{i_2, i_3} h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_2, i_3, \dots, i_n = 2\\i_2 \neq i_3 \neq \dots \neq i_n}}^{n} \dot{f}(t - 2h - \theta_{i_2, i_3} h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_2, i_3, \dots, i_n = 2\\i_2 \neq i_3 \neq \dots \neq i_n}}^{n} \dot{f}(t - 2h - \theta_{i_2, i_3} h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_2, i_3, \dots, i_n = 2\\i_2 \neq i_3 \neq \dots \neq i_n}}^{n} \dot{f}(t - 2h - \theta_{i_2, i_3} h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_2, i_3, \dots, i_n = 2\\i_2 \neq i_3 \neq \dots \neq i_n}}^{n} \dot{f}(t - 2h - \theta_{i_2, i_3} h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_2, i_3, \dots, i_n = 2\\i_2 \neq i_3 \neq \dots \neq i_n}}^{n} \dot{f}(t - 2h - \theta_{i_2, i_3} h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_2, i_3, \dots, i_n = 2\\i_2 \neq i_3 \neq \dots \neq i_n}}^{n} \dot{f}(t - 2h - \theta_{i_2, i_3} h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_2, i_3, \dots, i_n = 2\\i_2 \neq i_3 \neq \dots \neq i_n}}^{n} \dot{f}(t - 2h - \theta_{i_2, i_3} h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_2, i_3, \dots, i_n = 2\\i_2 \neq i_3 \neq \dots \neq i_n}}^{n} \dot{f}(t - 2h - \theta_{i_2, i_3, \dots, i_n} h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_2, i_3, \dots, i_n \neq i_n}}^{n} \dot{f}(t - 2h - \theta_{i_2, i_3, \dots, i_n} h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_2, i_3, \dots, i_n \neq i_n}}^{n} \dot{f}(t - 2h - \theta_{i_2, i_3, \dots, i_n} h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_2, i_3, \dots, i_n \neq i_n}}^{n} \dot{f}(t - 2h - \theta_{i_2, i_3, \dots, i_n} h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_2, i_3, \dots, i_n \neq i_n}}^{n} \dot{f}(t - 2h - \theta_{i_2, i_3, \dots, i_n} h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_2, i_3, \dots, i_n \neq i_n}}^{n} \dot{f}(t - 2h - \theta_{i_2, i_3, \dots, i_n} h)$$

если f(t) имеет непрерывную и ограниченную производную n-го порядка на промежутке Θ , то остаток R(t) определяется в виде

$$R(t) = h^{n} f^{(n)}(t - 9nh).$$
(1.15)

Отметим, что в теореме 1 и следствии 1 коэффициенты $k_i \ge 1$. В частности, если t — это время, а *h* — запаздывание, то все переменные в правой части выражений (1.4) и (1.13) доступны измерению (за исключением функции остатка). Рассмотрим случай, когда все или часть коэффициентов k_i принадлежит интервалу (0; 1). Это означает, что некоторые функции не доступны измерению. Покажем, как в данном случае выразить искомую функцию через измеряемые переменные. Как отмечалось во введении, подобная идея была предложена в работе [10]. Однако полученный в этой работе результат не содержит значение ошибки и время аппроксимации, а кроме того, предложенный алгоритм [10] имеет ограничения на число слагаемых в правой части аппроксимирующей функции в зависимости от времени запаздывания. Рассмотрим решение данной задачи.

Заменим в выражении (1.13) h на h/k, где k > 1, и перепишем (1.13) в виде

$$f(t) = \sum_{i=1}^{n} (-1)^{i-1} C_n^i f\left(t - \frac{i}{k}h\right) + R(t). \quad (1.16)$$

Здесь остаток R(t) определяется согласно формулам (1.14) или (1.15) заменой h на h/k.

Рассмотрим число z, которое равно целой части числа k, если k — не целое число, или z равно k - 1, если k — целое число. Сдвинем влево аргумент функции f(t) в соотношении (1.16) на величину h/k последовательно z раз:

$$f\left(t - \frac{1}{k}h\right) =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} (-1)^{i-1} C_n^i f\left(t - \frac{i+1}{k}h\right) + R\left(t - \frac{1}{k}h\right);$$

$$f\left(t - \frac{2}{k}h\right) =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} (-1)^{i-1} C_n^i f\left(t - \frac{i+2}{k}h\right) + R\left(t - \frac{2}{k}h\right); \quad (1.17)$$

$$\vdots$$

$$f\left(t - \frac{z}{k}h\right) =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} (-1)^{i-1} C_n^i f\left(t - \frac{i+z}{k}h\right) + R\left(t - \frac{z}{k}h\right).$$

Очевидно, что правая часть в последнем выражении системы (1.17) содержит слагаемые, у которых запаздывание больше, чем *h*. Выразим функцию f(t) относительно переменных $f\left(t - \frac{i+z}{k}h\right)$,

..., $f\left(t - \frac{n+z}{k}h\right)$. Для этого перепишем систему, состоящую из уравнений (1.16) и (1.17), в матричном виде:

$$A_1 f(t) + A_2 F_1(t) + A_3 F_2(t) = \tilde{R}(t), \qquad (1.18)$$

где

$$A_{1} = \begin{bmatrix} 1\\0\\\vdots\\0 \end{bmatrix}, F_{1}(t) = \begin{bmatrix} f\left(t - \frac{1}{k}h\right)\\f\left(t - \frac{2}{k}h\right)\\\vdots\\f\left(t - \frac{z}{k}h\right)\\f\left(t - \frac{z+z}{k}h\right)\\\vdots\\f\left(t - \frac{1+z}{k}h\right)\\\vdots\\f\left(t - \frac{1+z}{k}h\right)\\\vdots\\f\left(t - \frac{1+z}{k}h\right)\\\vdots\\R\left(t - \frac{1+z}{k}h\right)\\\vdots\\R\left(t - \frac{z}{k}h\right)\\\vdots\\R\left(t - \frac{z}{k}h\right)\\\vdots\\R\left(t - \frac{z}{k}h\right)\\\vdots\\R\left(t - \frac{z}{k}h\right)\\\vdots\\$$

Мехатроника, автоматизация, управление, Том 18, № 3, 2017

элементы матриц A_2 и A_3 соответствуют коэффициентам системы (1.17), (1.18).

Теорема 2. Φ ункция f(t) на промежутке Θ может быть представлена в виде

$$f(t) = -(lA_2^L A_1)^{-1} lA_2^L (A_3 F_2(t) - \widetilde{R}(t)), \quad (1.19)$$

где квадратная матрица A_2^L — левый делитель нуля

матрицы A_2 ; порядок A_2^L равен числу уравнений в системе (1.17) и (1.18), $l = [1 \ 0...0]$. Если f(t) имеет непрерывную и ограниченную производную первого порядка на промежутке Θ , то первая компонента R(t)

вектора $\widetilde{R}(t)$ определяется в виде (1.14) с заменой h на h/k; если f(t) имеет непрерывную и ограниченную производную n-го порядка на множестве Θ , то первая

компонента R(t) вектора $\dot{R}(t)$ определяется в виде (1.15) с заменой h на h/k.

Под левым делителем нуля матрицы A_2 понимается матрица A_2^L такая, что $A_2^L A_2 = 0$, где 0 — нулевая матрица соответствующего порядка [11, 12]. Ради простоты выводов в теореме 3 матрица A_2^L полагается квадратной. На самом деле число строк в матрице A_2^L можно свести к единице, тогда в выражении (1.19) l = 1. Это следует из того, что система (1.16), (1.17) имеет единственное решение f(t) относительно переменных $f\left(t - \frac{1+z}{k}h\right), ..., f\left(t - \frac{n+z}{k}h\right)$.

Доказательство. Умножив слева уравнение (1.18) на матрицу A_2^L , получим

$$A_2^L A_1 f(t) + A_2^L A_3 F_2(t) = A_2^L \widetilde{R}(t).$$
(1.20)

Система (1.20) состоит из линейно зависимых уравнений. Выделим первое уравнение в (1.20), умножив слева (1.20) на вектор *l*:

$$lA_{2}^{L}A_{1}f(t) + lA_{2}^{L}A_{3}F_{2}(t) = lA_{2}^{L}\widetilde{R}(t).$$
(1.21)

Так как $lA_2^L A_1 \neq 0$, то из уравнения (1.21) получим формулу (1.19).

Теорема 3 сформулирована для постоянного шага в разностях (1.1)—(1.3). Обобщим теорему 3 на случай с переменным шагом. Для этого рассмотрим формулу (1.4), где все или часть k_i меньше единицы. Далее будем сдвигать влево аргументы функции (1.4) до тех пор, пока в правой части не получим функции со сдвигом не менее, чем h. В результате имеем систему уравнений с единственным решением f(t) со сдвигом аргумента влево не менее чем h. Введем обозначения в данной системе: \tilde{A}_2 — матрица, элементы которой соответствуют коэффициентам, стоящим перед функциями f(t) с запаз-

дыванием, меньшим, чем h; \tilde{A}_2^L — левый делитель нуля матрицы \tilde{A}_2 ; $\tilde{F}_2(t)$ — вектор, содержащий функции, запаздывание которых не менее, чем h; \tilde{A}_3 — матрица, элементы которой содержат коэффициенты перед функциями, запаздывание которых менее, чем h.

Сформулируем теорему, обобщающую теорему 2 для разностей с переменным шагом в формулах (1.1)—(1.3).

Теорема 3. Функция f(t) на промежутке Θ может быть представлена в виде

$$f(t) = -(l\tilde{A}_{2}^{L}A_{1})^{-1}l\tilde{A}_{2}^{L}(\tilde{A}_{3}\tilde{F}_{2}(t) - \hat{R}(t)), \quad (1.22)$$

где $\hat{R}(t)$ — остаток, вид которого зависит от числа раз дифференцируемости функции f(t); первая компонента R(t) вектора $\hat{R}(t)$ определяется согласно теореме 1.

Доказательство теоремы 3 аналогично доказательству теоремы 2, поэтому из-за громоздких выводов, возникающих при использовании переменного шага, доказательство здесь не приводится.

2. Алгоритмы скользящей аппроксимации

Положим, что f(t) — это функция времени, определенная на интервале $[0; \infty)$. Измерению доступна только функция f(t - h), где h > 0 — время запаздывания. Воспользуемся результатами предыдущего раздела для получения алгоритмов аппроксимации функции f(t) со сдвигом на время h.

Теорема 4. Φ ункция $f_a^1(t)$, заданная формулой

$$f_a^1(t) = \sum_{i_1=1}^n f(t - k_{i_1}h) - \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_1, i_2=1\\i_1 \neq i_2}}^n f(t - (k_{i_1} + k_{i_2})h) + \frac{1}{3!} \sum_{\substack{i_1, i_2, i_3=1\\i_1 \neq i_2 \neq i_3}}^n f(t - (k_{i_1} + k_{i_2} + k_{i_3})h) + \dots + \frac{(-1)^{n+1}}{n!} \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n=1\\i_1 \neq i_2 \neq \dots \neq i_n}}^n f(t - (k_{i_1} + k_{i_2} + \dots + k_{i_n})h), (2.1)$$

при k_i ≥ 1 является аппроксимирующей для функции f(t) по ее предшествующим значениям. Для формулы (2.1): 1) время аппроксимации T составляет

$$T = \sum_{i=1}^{n} k_i h; \qquad (2.2)$$

2) если f(t) имеет непрерывную и ограниченную производную первого порядка, то ошибка аппроксимации

+

 $e_1(t) = R(t)$, где R(t) определяется выражением (1.5), и для $e_1(t)$ справедлива оценка

$$e_1(t) \leq k_1 h \left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{A_{n-1}^i}{i!} \right) \sup_{t > T} |\dot{f}(t)|,$$
 (2.3)

 $e\partial e A_n^l = \frac{n!}{(n-l)!};$

3) если f(t) имеет непрерывную и ограниченную производную n-го порядка, то ошибка аппроксимации $e_1(t) = R(t)$, где R(t) определяется выражением (1.6), для которого справедлива оценка

$$e_1(t) \le k_1^n h^n \sup_{t > T} |f^{(n)}(t)|.$$
 (2.4)

Доказательство. Доказательство первой части теоремы 5 очевидно, так как *T* — максимальное запаздывание в формуле (1.4).

Рассмотрим вторую часть теоремы. Если f(t) имеет непрерывную и ограниченную производную первого порядка, то ошибка аппроксимации $e_1(t)$ определяется выражением (1.5). Так как время аппроксимации равно T, то рассмотрим оценку сверху для функции $e_1(t)$ на интервале (T; ∞):

$$e_{1}(t) \leq k_{1}h \sup_{t \geq T} \left| \dot{f}(t - \theta_{1}k_{1}h) - \frac{\sum_{i_{2}=2}^{n} \dot{f}(t - k_{i_{2}}h - \theta_{i_{2}}k_{1}h) +}{\sum_{i_{2}\neq i_{3}=2}^{n} \dot{f}(t - (k_{i_{2}} + k_{i_{3}})h - \theta_{i_{2},i_{3}}k_{1}h) + \dots + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_{2},i_{3}=2\\i_{2}\neq i_{3}}}^{n} \dot{f}(t - (k_{i_{2}} + k_{i_{3}})h - \theta_{i_{2},i_{3}}k_{1}h) + \dots + \frac{1}{(n-1)!} \sum_{\substack{i_{2},i_{3},\dots,i_{n}=2\\i_{2}\neq i_{3}\neq\dots\neq i_{n}}}^{n} \dot{f}(t - (k_{i_{2}} + k_{i_{3}} + \dots + k_{i_{n}})h - \theta_{i_{2},i_{3}}k_{1}h) + \dots + \frac{1}{(n-1)!} \sum_{\substack{i_{2},i_{3},\dots,i_{n}=2\\i_{2}\neq i_{3}\neq\dots\neq i_{n}}}^{n} \dot{f}(t - (k_{i_{2}} + k_{i_{3}} + \dots + k_{i_{n}})h - \theta_{i_{2},i_{3}}k_{1}h) + \dots + \frac{1}{(n-1)!} \sum_{\substack{i_{2},i_{3},\dots,i_{n}=2\\i_{2}\neq i_{3}\neq\dots\neq i_{n}}}^{n} \dot{f}(t - (k_{i_{2}} + k_{i_{3}} + \dots + k_{i_{n}})h - \theta_{i_{2},i_{3},\dots,i_{n}}k_{1}h) + \dots + \frac{1}{(n-1)!} \sum_{\substack{i_{2},i_{3},\dots,i_{n}\neq i_{n}}}^{n} \dot{f}(t - (k_{i_{2}} + k_{i_{3}} + \dots + k_{i_{n}})h - \theta_{i_{2},i_{3},\dots,i_{n}}k_{1}h) + \dots + \frac{1}{(n-1)!} \sum_{\substack{i_{2},i_{3},\dots,i_{n}\neq i_{n}}}^{n} \dot{f}(t - (k_{i_{2}} + k_{i_{3}} + \dots + k_{i_{n}})h - \theta_{i_{2},i_{3},\dots,i_{n}}k_{1}h) + \dots + \frac{1}{(n-1)!} \sum_{\substack{i_{2},i_{3},\dots,i_{n}\neq i_{n}}}^{n} \dot{f}(t) + \dots + \frac{A_{n-1}^{n-1}}{(n-1)!} \sum_{\substack{i_{2},\dots,i_{n}\neq i_{n}}}^{n} \dot{f}(t) + \dots + \frac{A_{n-1}^{n-1}}{(n-1)!} \sum_{\substack{i_{2},\dots,i_{n}\neq i_{n}}}^{n} \dot{f}(t) + \dots + \frac{A_{n-1}^{n-1}}{(n-1)!} \sum_{\substack{i_{2},\dots,i_{n}\neq i_{n}}}^{n} \dot{f}(t) + \dots + \dots + \frac{A_{n-1}^{n-1}}{(n-1)!} \sum_{\substack{i_{2},\dots,i_{n}\neq i_{n}}}^{n} \dot{f}(t) + \dots + \dots + \frac{A_{n-1}^{n-1}}{(n-1)!} \sum_{\substack{i_{2},\dots,i_{n}\neq i_{n}}}^{n} \dot{f}(t) + \dots +$$

Из соотношения (2.5) следует оценка (2.3). Выражение (2.4) является очевидной оценкой сверху функции (1.6).

Следствие 2. При $k_1 = k_2 = ... = k_n = 1$ аппроксимирующая функция $f_a^2(t)$ для f(t) задается формулой

$$f_a^2(t) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} C_n^i f(t-ih).$$
(2.6)

Время аппроксимации T определяется выражением T = nh. (2.7)

Если f(t) имеет непрерывную и ограниченную производную первого порядка, то ошибка аппроксимации $e_2(t) = R(t)$, где R(t) определяется выражением (1.14). Для $e_2(t)$ справедлива оценка сверху

$$e_2(t) \leq h\left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{A_{n-1}^i}{i!}\right) \sup_{t > T} |\dot{f}(t)|;$$

если f(t) имеет непрерывную и ограниченную производную n-го порядка, то ошибка аппроксимации $e_2(t) = R(t)$, где R(t) определяется выражением (1.15) и для $e_2(t)$ справедлива оценка

$$e_2(t) \leq h^n \sup_{t > T} |f^{(n)}(t)|.$$

При $k_1 = k_2 = ... = k_n = 1$ и дискретном времени формула (2.6) приведена в работе [9].

Теорема 5. Аппроксимирующую функцию $f_a^3(t)$ для f(t) можно представить в виде

$$F_a^3(t) = -(lA_2^L A_1)^{-1} lA_2^L A_3 F_2(t).$$
(2.8)

Время аппроксимации Т определяется как

$$T = \frac{n+z}{k}h.$$
 (2.9)

Ошибка аппроксимации задается выражением

$$e_3(t) = (lA_2^L A_1)^{-1} lA_2^L \tilde{R}(t).$$
 (2.10)

Если f(t) имеет непрерывную и ограниченную производную первого порядка, то для ошибки аппроксимации (2.10) справедлива оценка

$$e_{3}(t) \leq \|(lA_{2}^{L}A_{1})^{-1}lA_{2}^{L}\| \times \sqrt{z+1} \frac{h}{k} \left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{A_{n-1}^{i}}{i!}\right) \sup_{t > T} |\dot{f}(t)|.$$
(2.11)

Если f(t) имеет непрерывную и ограниченную производную n-го порядка, то для ошибки аппроксимации справедлива оценка

$$e_{3}(t) \leq \|(lA_{2}^{L}A_{1})^{-1}lA_{2}^{L}\| \sqrt{z+1} \frac{h^{n}}{k^{n}} \sup_{t \geq T} |f^{(n)}(t)|. \quad (2.12)$$

Доказательство. Так как вектор $\tilde{R}(t)$ в выражении (1.19) содержит максимальное запаздывание $\frac{n+z}{k}h$, то время аппроксимации задается формулой (2.9).

Пусть f(t) имеет непрерывную и ограниченную производную первого порядка. Тогда первая компонента вектора $\vec{R}(t)$ определяется в виде (1.14) с заменой h на h/k. С учетом этого рассмотрим оценку сверху для $e_3(t)$ на интервале $(T; \infty)$:

$$e_{3}(t) \leq \|(lA_{2}^{L}A_{1})^{-1}lA_{2}^{L}\|\|\widetilde{R}(t)\| = \|(lA_{2}^{L}A_{1})^{-1}lA_{2}^{L}\| \times \sqrt{R^{2}(t) + R^{2}(t - \frac{1}{k}h) + \dots + R^{2}(t - \frac{z}{k}h)} \leq \|(lA_{2}^{L}A_{1})^{-1}lA_{2}^{L}\|\sqrt{z + 1} \sup_{t \geq T} |R(t)|.$$
(2.13)

Принимая во внимание соотношение (2.3), получим оценку (2.11). С учетом выражений (1.15) (с заменой h на h/k) и (2.4) получим оценку (2.13).

Теорема 6. Аппроксимирующую функцию $f_a^4(t)$ для f(t) можно представить в виде

$$f_a^4(t) = -(l\tilde{A}_2^L A_1)^{-1} l\tilde{A}_2^L \tilde{A}_3 \tilde{F}_2(t), \qquad (2.14)$$

где ошибка аппроксимации $e_4(t)$ задается функцией R(t) в теореме 4.

Доказательство теоремы 6 аналогично доказательству теорем 3 и 5.

3. Алгоритмы скользящей аппроксимации с частичной компенсацией ошибки аппроксимации

Точность аппроксимации в алгоритмах (2.1), (2.6), (2.8) и (2.13) определяется соответствующими функциями остатков. Настоящий раздел посвящен синтезу алгоритмов, использующих информацию об остатках разложения, что может позволить увеличить точность аппроксимации. **Теорема 7.** Φ ункция $\tilde{f}_a^1(t)$, заданная формулой

$$\tilde{f}_a^1(t) = f_a^1(t) + u_1(t),$$
 (3.1)

при $k_i \ge 1$ является оценкой функции f(t) по ее предшествующим значениям, $u_1(t)$ — сигнал, несущий информацию об остатке (1.5) или (1.6). Если f(t) имеет непрерывные и ограниченные производные первого и второго порядков, то сигнал u₁(t) и оценка ошибки аппроксимации $\tilde{e}_1(t)$ определяются выражениями

$$u_{1}(t) = k_{1}h \left[\dot{f}(t - \hat{\theta}_{1}k_{1}h) - \sum_{i_{2}=2}^{n} \dot{f}(t - k_{i_{2}}h - \hat{\theta}_{i_{2}}k_{1}h) + \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_{2}, i_{3}=2\\i_{1}\neq i_{2}}}^{n} \dot{f}(t - (k_{i_{2}} + k_{i_{3}})h - \hat{\theta}_{i_{2}, i_{3}}k_{1}h) + \dots + \frac{(-1)^{n+1}}{(n-1)!} \sum_{\substack{i_{2}, i_{3}, \dots, i_{n}=2\\i_{2}\neq i_{3}\neq \dots\neq i_{n}}}^{n} \dot{f}(t - (k_{i_{2}} + k_{i_{3}} + \dots + k_{i_{n}})h - \hat{\theta}_{i_{2}, i_{3}, \dots, i_{n}}k_{1}h) \right]; \quad (3.2)$$

$$\widetilde{e}_{1}(t) \leq k_{1}h\left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{A_{n-1}^{i}}{i!}\right) \times \left((k_{1}h \sup_{t \geq T} |\vec{f}(t)| + \sup_{t \geq T} |\delta^{1}(t)| \right).$$
(3.3)

Если f(t) имеет непрерывные и ограниченные производные n-го u (n + 1)-го порядков, то сигнал $u_1(t)$ uоценка ошибки аппроксимации $\tilde{e}_1(t)$ определяются в виде

$$u_1(t) = k_1^n h^n \hat{f}^{(n)} \left(t - \hat{9}h \sum_{i=1}^n k_i \right), \qquad (3.4)$$

$$\tilde{e}_{1}(t) \leq k_{1}^{n} h^{n} \left[h \sum_{i=1}^{n} k_{i} \sup_{t > T} |f^{(n+1)}(t)| + \sup_{t > T} |\delta^{n}(t)| \right]. (3.5)$$

Здесь $\hat{f}^{(i)}(t)$ — оценка і-й производной функции

$$f(t), \,\delta^{1}(t) = \dot{f}(t) - \dot{f}(t), \,\delta^{n}(t) = f^{(n)} \left(t - \hat{9}h \sum_{i=1}^{n} k_{i} \right) - \delta^{(n)} \left(1 - \hat{9}h \sum_{i=1}^{n} k_{i} \right)$$

 $-\hat{f}^{(n)}\left(t-\hat{9}h\sum_{i=1}^{n}k_{i}\right)$ — ошибки оценки первой и п-й

производной соответственно, коэффициенты $\hat{9}$ =

$$= \left(1 / \sum_{i=1}^{n} k_{i}; 1\right) u \hat{\theta}_{i_{2}} \in (1/k_{1}; 1), \hat{\theta}_{i_{2}, i_{3}}, ..., \hat{\theta}_{i_{2}, i_{3}, ..., i_{n}} \in (0; 1)$$

 $\in (0; 1)$ выбираются разработчиком, время T опре делено выражением (2.2).

Отметим, что время аппроксимации Т в алгоритме (3.1) не меньше значения (2.2) и зависит от наблюдателя, посредством которого получены оценки $\hat{f}^{(i)}(t)$.

Доказательство. Ради простоты изложения доказательства рассмотрим сначала получение оценки (3.5). С учетом (1.6) и (3.4) найдем разность $\widetilde{e}_1(t) = R(t) - u_1(t)$ в виде

$$\widetilde{e}_{1}(t) = \\ = k_{1}^{n} h^{n} \bigg[f^{(n)} \bigg(t - \vartheta h \sum_{i=1}^{n} k_{i} \bigg) - \widehat{f}^{(n)} \bigg(t - \vartheta h \sum_{i=1}^{n} k_{i} \bigg) \bigg] = \\ = k_{1}^{n} h^{n} \bigg[f^{(n)} \bigg(t - \vartheta h \sum_{i=1}^{n} k_{i} \bigg) - f^{(n)} \bigg(t - \vartheta h \sum_{i=1}^{n} k_{i} \bigg) + \\ + f^{(n)} \bigg(t - \vartheta h \sum_{i=1}^{n} k_{i} \bigg) - \widehat{f}^{(n)} \bigg(t - \vartheta h \sum_{i=1}^{n} k_{i} \bigg) \bigg]. \quad (3.6)$$

Пусть $\hat{\vartheta} = \vartheta + \widetilde{\vartheta}$. Тогда, применяя теорему Лагранжа к соотношению (3.6), получим

$$\widetilde{e}_{1}(t) = k_{1}^{n} h^{n} \left[\widetilde{\vartheta} h \sum_{i=1}^{n} k_{i} f^{(n+1)} \times (t - (\vartheta + \overline{\vartheta} \widetilde{\vartheta}) h \sum_{i=1}^{n} k_{i}) + \delta^{n}(t) \right], \qquad (3.7)$$

где $\overline{9} \in (0; 1)$. Так как $(9 + \overline{9} \ \overline{9}) \in (0; 1)$, то функцию (3.7) можно оценить сверху в виде (3.5).

Аналогичным образом получим оценку (3.3). Принимая во внимание выражения (1.5) и (3.2), найдем разность $\tilde{e}_1(t) = R(t) - u_1(t)$ в виде

$$\begin{split} \widetilde{e}_{1}(t) &= k_{1}h \Bigg[\dot{f}(t-\theta_{1}k_{1}h) - \sum_{i_{2}=2}^{n} \dot{f}(t-k_{i_{2}}h-\theta_{i_{2}}k_{1}h) + \\ &+ \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_{2},i_{3}=2\\i_{12}\neq i_{3}}}^{n} \dot{f}(t-(k_{i_{2}}+k_{i_{3}})h-\theta_{i_{2},i_{3}}k_{1}h) + \ldots + \\ &+ \frac{(-1)^{n+1}}{(n-1)!} \sum_{\substack{i_{2},i_{3},\ldots,i_{n}=2\\i_{2}\neq i_{3}\neq\ldots\neq i_{n}}}^{n} \dot{f}(t-(k_{i_{2}}+k_{i_{3}}+\ldots+k_{i_{n}})h- \\ &- \theta_{i_{2},i_{3},\ldots,i_{n}}k_{1}h) - \dot{f}(t-\hat{\theta}_{1}k_{1}h) + \\ &+ \sum_{i_{2}=2}^{n} \dot{f}(t-k_{i_{2}}h-\hat{\theta}_{i_{2}}k_{1}h) - \\ &- \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_{2},i_{3}=2\\i_{1}\neq i_{2}}}^{n} \dot{f}(t-(k_{i_{2}}+k_{i_{3}})h-\hat{\theta}_{i_{2},i_{3}}k_{1}h) + \ldots + \\ &+ \frac{(-1)^{n+1}}{(n-1)!} \sum_{\substack{i_{2},i_{3}=\ldots,i_{n}=2\\i_{2}\neq i_{3}\neq\ldots\neq i_{n}}}^{n} \dot{f}(t-(k_{i_{2}}+k_{i_{3}})h-\hat{\theta}_{i_{2},i_{3}}k_{1}h) + \ldots + \\ &- \frac{\hat{\theta}_{i_{2},i_{3},\ldots,i_{n}}k_{1}h \end{bmatrix} \pm k_{1}h \Bigg[\dot{f}(t-\hat{\theta}_{1}k_{1}h) - \\ &- \sum_{\substack{i_{2}=2\\i_{2}\neq i_{3}\neq\ldots\neq i_{n}}}^{n} \dot{f}(t-(k_{i_{2}}+k_{i_{3}})h-\hat{\theta}_{i_{2},i_{3}}k_{1}h) + \ldots + \\ &+ \frac{(-1)^{n+1}}{(n-1)!} \sum_{\substack{i_{2},i_{3}=\ldots\neq i_{n}}}^{n} \dot{f}(t-(k_{i_{2}}+k_{i_{3}}+\ldots+k_{i_{n}})h- \\ &- \sum_{i_{2}\neq i_{3}\neq\ldots\neq i_{n}}^{n} \dot{f}(t-(k_{i_{2}}+k_{i_{3}})h-\hat{\theta}_{i_{2},i_{3}}k_{1}h) + \ldots + \\ &+ \frac{(-1)^{n+1}}{(n-1)!} \sum_{\substack{i_{2},i_{3}=\ldots,i_{n}=2\\i_{2}\neq i_{3}\neq\ldots\neq i_{n}}}^{n} \dot{f}(t-(k_{i_{2}}+k_{i_{3}}+\ldots+k_{i_{n}})h- \\ &- \hat{\theta}_{i_{2},i_{3},\ldots,i_{n}k_{1}h \end{bmatrix} \Bigg]. \end{split}$$

Пусть $\hat{\theta}_{i_2} = \theta_{i_2} + \tilde{\theta}_{i_2}, ..., \hat{\theta}_{i_2, i_3, ..., i_n} = \theta_{i_2, i_3, ..., i_n} +$ + $\tilde{\theta}_{i_2, i_3, \dots, i_n}$, $i_2, i_3, \dots, i_n = 2, 3, \dots, n$. Применяя теорему Лагранжа о среднем к выражению (3.8), получим

$$\widetilde{e}_{1}(t) = k_{1}h \left[\widetilde{\Theta}_{1}k_{1}h\ddot{f}(t - (\Theta_{1} + \overline{\Theta}_{1}\widetilde{\Theta}_{1})k_{1}h) - \sum_{i_{2}=2}^{n} \widetilde{\Theta}_{i_{2}}k_{1}h\ddot{f}(t - k_{i_{2}}h - (\Theta_{i_{2}} + \overline{\Theta}_{i_{2}}\widetilde{\Theta}_{i_{2}})k_{1}h) + \right]$$

$$+ \frac{1}{2!} \sum_{\substack{i_{2}, i_{3} = 2 \\ i_{1} \neq i_{2}}}^{n} \widetilde{\theta}_{i_{2}, i_{3}} k_{1}h\ddot{f}(t - (k_{i_{2}} + k_{i_{3}})h - (\theta_{i_{2}, i_{3}} + \theta_{i_{2}, i_{3}} \widetilde{\theta}_{i_{2}, i_{3}})k_{1}h) + \dots + (\theta_{i_{2}, i_{3}} + \theta_{i_{2}, i_{3}} \widetilde{\theta}_{i_{2}, i_{3}})k_{1}h) + \dots + (\theta_{i_{2}, i_{3}} + \theta_{i_{2}, i_{3}} + \theta_{i_{3}} + \theta_{i_{3$$

Здесь $\overline{\theta}_{i_1}, \ \overline{\theta}_{i_2}, \ \overline{\theta}_{i_2, i_3}, \ ..., \ \overline{\theta}_{i_2, i_3, \ ..., \ i_n} \in (0; \ 1).$ Из последнего выражения следует оценка (3.3). **Теорема 8.** Φ ункция $\tilde{f}_a^2(t)$, заданная формулой

$$\widetilde{f}_a^2(t) = f_a^2(t) + u_2(t),$$
 (3.9)

является оценкой функции f(t) по ее предшествующим значениям, где $u_2(t)$ — сигнал, несущий информацию об остатке (1.14) или (1.15). Если f(t) имеет непрерывные и ограниченные производные первого и второго порядков, то сигнал и2(t) и оценка ошибки аппроксимации $\tilde{e}_2(t)$ определяются выражениями

$$u_{2}(t) = h[\dot{f}(t-h) - \dot{f}(t-h-\hat{\theta}_{2}h) + \frac{1}{2!}\dot{f}(t-2h-h-\hat{\theta}_{3}h) + \dots + \frac{(-1)^{n+1}}{(n-1)!}\dot{f}(t-(n-1)h-\hat{\theta}_{n}h)]; (3.10)$$

$$\tilde{a}_{n}(t) \leq h\left(1 + \sum_{n=1}^{n-1}A_{n-1}^{i}\right)(h \sin|\ddot{f}(t)| + \sin|\delta^{1}(t)|)$$

$$\widetilde{e}_{2}(t) \leq h \left[1 + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{n-1}{i!} \right] (h \sup_{t>T} |f(t)| + \sup_{t>T} |\delta^{1}(t)|).$$
From $f(t)$ we can compare using a companying up to the set of the set

Если f(t) имеет непрерывные и ограниченные производные n-го и (n + 1)-го порядков, то сигнал $u_2(t)$ и точность аппроксимации $\tilde{e}_2(t)$ в виде

$$u_2(t) = h^n \hat{f}^{(n)}(t - \hat{\vartheta} nh), \qquad (3.11)$$

$$\widetilde{e}_2(t) \leq h^n [nh \sup_{t > T} |f^{(n+1)}(t)| + \sup_{t > T} |\delta^n(t)|].$$

Здесь $\hat{f}^{(i)}(t)$ — оценка *i*-й производной функции f(t), $\delta^{1}(t) = \dot{\hat{f}}(t) - \dot{f}(t), \delta^{n}(t) = f^{(n)}(t - \hat{9} nh) - \hat{f}^{(n)}(t - \hat{9} nh),$ коэффициенты $\hat{9} = (1/nh; 1), \hat{\theta}_{2}, \hat{\theta}_{3}, ..., \hat{\theta}_{n} \in (0; 1)$ выбираются разработчиком, время T определено выражением (2.7).

Доказательство теоремы 8 следует из доказательства теоремы 7.

Теорема 9. Функция $\tilde{f}_a^3(t)$, заданная формулой

$$\tilde{f}_a^3(t) = f_a^3(t) + u_3(t),$$
 (3.12)

является оценкой функции f(t) по ее предшествующим значениям, где

$$u_3(t) = (lA_2^L A_1)^{-1} lA_2^L Z(t); \qquad (3.13)$$

$$Z(t) = \left[\widetilde{u}(t), \ \widetilde{u}\left(t - \frac{1}{k}h\right), \ \dots, \ \widetilde{u}\left(t - \frac{z}{k}h\right) \right];$$
$$\widetilde{e}_{3}(t) \leq \left\| (lA_{2}^{L}A_{1})^{-1}lA_{2}^{L} \right\| \sup_{t \geq T} |\widetilde{R}(t) - Z(t)|.$$

Если f(t) имеет непрерывную и ограниченную производную первого порядка, то сигнал $\tilde{u}(t)$ задается функцией (3.10) с заменой h на h/k, k > 1, причем, если запаздывание в некотором слагаемом (3.10) меньше h, то данное слагаемое заменяется на $\hat{f}(t-h)$ или 0. Если f(t) имеет непрерывную и ограниченную производную n-го порядка, то сигнал $\tilde{u}(t)$ определяется функцией (3.11) с заменой h на h/k, причем, если запаздывание в выражении (3.11) меньше h, то (3.11) заменяется на $\hat{f}^{(n)}(t-h)$ или 0, время T определено выражением (2.9).

Доказательство теоремы 9 следует из доказательства теоремы 8.

Теорема 10. Функция $\tilde{f}_{a}^{4}(t)$, заданная формулой

$$\tilde{f}_a^4(t) = f_a^4(t) + u_4(t),$$
 (3.14)

является оценкой функции f(t) по ее предшествующим значениям, где

$$u_4(t) = (l\tilde{A}_2^L A_1)^{-1} l\tilde{A}_2^L W(t), \qquad (3.15)$$

$$\widetilde{e}_4(t) \leq \|(l\widetilde{A}_2^L A_1)^{-1} l\widetilde{A}_2^L\| \sup_{t > T} |\widehat{R}(t) - W(t)|.$$

Здесь W(t) — оценка сигнала $\hat{R}(t)$, где первая компонента W(t) задается выражением (3.2) или (3.4). Если запаздывание некоторых компонент вектора W(t) меньше h, то данные компоненты заменяются на 0 или соответствующие функции с запаздыванием h.

Доказательство теоремы 10 следует из доказательства теоремы 7. Продемонстрируем полученные результаты на численных примерах.

4. Алгоритмы скользящей аппроксимации

Рассмотрим алгоритмы (2.1), (2.6), (2.8) и (2.13). 1. Пусть n = 3, $k_1 = 1$, $k_2 = 2$ и $k_3 = 3$. Тогда алгоритм (2.1) будет иметь вид

$$f_a^{1}(t) = \sum_{i_1=1}^{3} f(t-k_{i_1}h) - \frac{1}{3} \sum_{\substack{i_1, i_2=1\\i_1\neq i_2}}^{3} f(t-(k_{i_1}+k_{i_2})h) + \frac{1}{6} \sum_{\substack{i_1, i_2, i_3=1\\i_1\neq i_2\neq i_3}}^{3} f(t-(k_{i_1}+k_{i_2}+k_{i_3})h).$$
(4.1)

Время аппроксимации T = 6h.

2. Зададим n = 3 и $k_1 = k_2 = k_3 = 1$. В результате получим алгоритм (2.6) в форме

$$f_a^2(t) = \sum_{i=1}^3 (-1)^{i-1} C_3^i f(t-ih).$$
(4.2)

Время аппроксимации T = 3h.

3. Сформируем алгоритм (2.8). Пусть n = 3 и k = 4. Отметим, что для данных параметров алгоритм аппроксимации, представленный в работе [10], не реализуем. Остальные параметры алгоритма (2.8) определены в виде

$$A_{1} = \begin{bmatrix} 1\\0\\0\\0 \end{bmatrix}, A_{2} = \begin{bmatrix} -3 & 3 & -1\\1 & -3 & 3\\0 & 1 & -3\\0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_{3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0\\-1 & 0 & 0\\3 & -1 & 0\\-3 & 3 & -1 \end{bmatrix},$$
$$F_{2}(t) = \begin{bmatrix} f(t-h)\\f\left(t-\frac{5h}{4}\right)\\f\left(t-\frac{5h}{2}\right)\end{bmatrix}.$$

Зададим A_2^L в виде

$$4_2^L = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 6 & -8 \\ 1 & 3 & 6 & -8 \\ 1 & 3 & 6 & -8 \\ 1 & 3 & 6 & -8 \\ 1 & 3 & 6 & -8 \end{bmatrix}$$

В результате алгоритм (2.8) будет иметь вид

$$f_a^3(t) = 15f(t-h) - 24f\left(t - \frac{5h}{4}\right) + 10f\left(t - \frac{3h}{2}\right).$$
(4.3)

Время аппроксимации T = 1,5h.

4. Сформируем алгоритм (2.13). Пусть $k_1 = 1/2$, $k_2 = 3/4$ и $k_3 = 1$. Остальные параметры алгоритма определены в виде

$$A_{1} = \begin{bmatrix} 1\\0\\0 \end{bmatrix}, A_{2} = \begin{bmatrix} -1 & -1\\1 & 0\\0 & 1 \end{bmatrix},$$
$$A_{3} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0\\-1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0\\0 & -1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, F_{2}(t) = \begin{bmatrix} f(t-h)\\f(t-\frac{5h}{4})\\f(t-\frac{5h}{2})\\f(t-\frac{3h}{2}) \end{bmatrix}.$$

Зададим A_2^L в виде матрицы третьего порядка, все элементы которой равны единице. В результате алгоритм (2.13) примет вид

$$f_{a}^{4}(t) = 2f(t-h) + f\left(t - \frac{5h}{4}\right) + f\left(t - \frac{3h}{2}\right) - f\left(t - \frac{7h}{4}\right) - 2f(t-2h) - f\left(t - \frac{9h}{4}\right) + f\left(t - \frac{11h}{4}\right) - f\left(t - \frac{5h}{2}\right) + f(t-3h).$$
(4.4)

Время аппроксимации T = 3h.

Продемонстрируем качество аппроксимации алгоритмов (4.1)—(4.4). Для этого рассмотрим не-известную функцию f(t):

$$f(t) = 0.1t + 1 + \sin(0.05t) + \cos(0.11t) + + \sin(0.21t + \pi/3) + \sin(0.27t + \pi/4).$$
(4.5)

Аппроксимируем функцию (4.5) с запаздыванием h = 1 (с) в реальном режиме времени. На рис. 1 представлены графики ошибок аппроксимации $e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t)$ и $e_4(t)$. При моделировании $e_i(t)$

считались как $e_i(t) = f_a^i(t) - f(t), i = \overline{1, 4}$.

На рис. 1 установившиеся значения ошибок $e_i(t), i = \overline{1, 4}$, не превосходят значений 0,66, 0,12, 0,035 и 0,126 после 6, 3, 1,5 и 3 с соответственно. Рассмотрим случайную функцию

$$f(t) = W(p)x(t), \qquad (4.6)$$

где p = d/dt, $W(s) = \frac{1}{s(20s + 1)}$, s — комплексная пе-

ременная, x(t) — кусочно-непрерывная функция, подчиненная нормальному закону распределения с математическим ожиданием 0, дисперсией 1 и временем дискретизации 0,001 с.

Аппроксимируем функцию (4.6) с запаздыванием h = 1 (с) в реальном режиме времени. На рис. 2, *а* представлен график случайной функции f(t), на рис. 2, δ — графики $e_1(t)$ и $e_2(t)$, на рис. 2, ϵ — графики $e_3(t)$ и $e_4(t)$.

На рис. 2, б, в установившиеся значения ошибок $e_i(t)$, $i = \overline{1, 4}$, не превосходят значений 0,007, 0,004, 0,005 и 0,0045 после 6, 3, 1,5 и 3 с соответственно. Отметим, что алгоритмы [2—5], аппроксимирующие синусоидальные сигналы, не могут быть применимы к аппроксимации функций (4.5) и (4.6).

5. Алгоритмы скользящей аппроксимации с частичной компенсацией ошибки аппроксимации

Теперь рассмотрим алгоритмы (3.1), (3.9), (3.12) и (3.14) с частичной компенсацией ошибки аппроксимации. Для оценки *i*-й производной f(t) воспользуемся алгоритмом

$$\hat{f}^{(i)}(t) = \left[\frac{p}{0,01p+1}\right]^i f(t).$$

1. Выберем $\hat{\theta}_1 = 1$, $\hat{\theta}_2 = 0.5$, $\hat{\theta}_3 = 0.5$, $\hat{\theta}_{2,3} = 0.5$ и $\hat{9} = 5/12$. Принимая во внимание выражение (4.1), сформируем алгоритм (3.1), где

$$u_1(t) = h[\dot{f}(t-h) - \dot{f}(t-2,5h) - \dot{f}(t-3,5h) + \dot{f}(t-5,5h)]$$



Рис. 1. Графики ошибок аппроксимации $e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t)$ и $e_4(t)$



Рис. 2. График случайной функции f(t) (a); графики ошибок аппроксимации $e_1(t)$, $e_2(t)$ (б), $e_3(t)$ и $e_4(t)$ (в)

или

$$u_1(t) = h^3 \hat{f}^{(3)}(t - 2, 5h).$$

2. Зададим $\hat{\theta}_1 = 1$, $\hat{\theta}_2 = 1$, $\hat{\theta}_3 = 1$ и $\hat{\vartheta} = 0,6$. С учетом выражения (4.2) определим алгоритм (3.9), где

$$u_2(t) = h[\dot{f}(t-h) - 2\dot{f}(t-2h) + \dot{f}(t-3h)]$$

или

$$u_2(t) = h^3 \hat{f}^{(3)}(t - 1, 8h)$$

3. Выберем $\hat{\theta}_1 = 2$, $\hat{\theta}_2 = 1$, $\hat{\theta}_3 = 1$, $\hat{\theta}_{2,3} = 0,1$ и $\hat{\vartheta} = 8/9$. Принимая во внимание выражение (4.3), сформируем алгоритм (3.12), где

$$u_{3}(t) = [111][\tilde{u}(t)\tilde{u}(t-0,5h)\tilde{u}(t-0,75h)]^{T},$$
$$\tilde{u}(t) = 0,5h[\dot{f}(t-h) - \dot{f}(t-1,25h) - \dot{f}(t-1,5h) + \dot{f}(t-1,8h)]$$

или

$$u_3(t) = h^3 \hat{f}^{(3)}(t - 2h)$$

Аппроксимируем неизвестную функцию (4.5) с запаздыванием h = 1 (с). На рис. 3, a-e представлены ошибки аппроксимации $e_i(t)$ и $\tilde{e}_i^j(t)$, i = 1, 2, 4, j = 1, 3, где $\tilde{e}_i^1(t) = \tilde{e}_i(t)$, если используется $u_i(t)$ с оценкой первой производной от f(t), $\tilde{e}_i^3(t) = \tilde{e}_i(t)$, если используется $u_i(t)$ с оценкой третьей производной от f(t). При моделировании $\tilde{e}_i^j(t)$ находится как $\tilde{e}_i^j(t) = \tilde{f}_a^i(t) - f(t)$.

Установившиеся значения ошибок $e_i(t)$, $\tilde{e}_i^1(t)$ и $\tilde{e}_i^3(t)$, представленные на рис. 3, *a*, не превосходят значений 0,66, 0,535, 0,1 после 6 с, на рис. 3, *б* не превосходят 0,12, 0,029, 0,0095 после 3 с, на рис. 3, *в* не превосходят 0,126, 0,103, 0,0145 после 3 с, причем значения ошибок аппроксимации существенно зависят от выбора $\hat{\theta}_i$ и $\hat{9}$.

Отметим, что при выводе алгоритма (3.14), (3.15) большая часть компонент вектора $\hat{R}(t)$ содержит запаздывание, меньшее, чем *h*. Поэтому результаты моделирования алгоритма (3.14) показали неудовлетворительные переходные процессы. Следовательно, использование алгоритмов (3.12) и (3.14) возможно, если остатки разложений содер-



жат незначительное число компонент с запаздыванием, меньшим, чем *h*.

Анализ результатов моделирования показал, что для гладких функций использование алгоритмов с частичной компенсацией ошибки аппроксимации позволяет уменьшить установившееся значение ошибки аппроксимации по сравнению с алгоритмами аппроксимации без частичной компенсации ошибки аппроксимации. Если аппроксимируемая функция имеет разрывы в производных, то рекомендуется использовать алгоритмы без частичной компенсации ошибки аппроксимации, так как значение функции на выходе наблюдателя в точках отсутствия производной может принимать достаточно большие значения.

Заключение

В статье представлен класс алгоритмов аппроксимации функции в реальном режиме времени, основанных на результатах теоремы Лагранжа о среднем с постоянным и переменным шагом. Синтезированы алгоритмы с частичной компенсацией ошибки аппроксимации. Получены значения времени и оценки ошибки аппроксимации.

Результаты моделирования показали, что для гладких функций использование алгоритмов с частичной компенсацией ошибки аппроксимации позволяет уменьшить установившееся значение ошибки аппроксимации по сравнению с алгоритмами аппроксимации без частичной компенсации ошибки аппроксимации. Если аппроксимируемая функция имеет разрывы в производных, то рекомендуется использовать алгоритмы без частичной компенсации ошибки аппроксимации, так как значение функции на выходе наблюдателя в точках разрыва производной может принимать достаточно большие значения.

Список литературы

1. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователей. М.: Наука, 1991.

2. Xia X. Global Frequency Estimation Using Adaptive Identifiers // IEEE Trans. on Automatic Control. 2002. Vol. 47. P. 1188–1193.

3. **Marino R., Tomei P.** Global Estimation of n Unknown Frequencies // IEEE Trans. on Automatic Control. 2002. Vol. 47. P. 1324–1328.

4. **Бобцов А. А., Пыркин А. А.** Компенсация гармонического возмущения в условиях запаздывания по управлению // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2008. № 4. С. 19–23.

5. **Фуртат И. Б.** Алгоритм компенсации неизвестных мультигармонических возмущений для объектов с запаздыванием по управлению // Информационно-управляющие системы. 2013. № 5 (66). С. 19—25.

6. Гончаров В. Л. Теория интерполирования и приближения функций. М.: ГИТТЛ, 1954.

7. Демидович Б. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики. М.: Физматгиз, 1963.

8. **Фихтенгольц Г. М.** Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 1. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.

9. Цыпкин Я. З. Скользящая аппроксимация и принцип поглощения // Доклады академии наук. 1997. Т. 357. № 6. С. 750—751.

10. Цыкунов А. М. Следящие системы для линейных объектов с запаздывающим управлением // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 3. С. 9—14.

11. Буков В. Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. Калуга: Изд-во научной литературы Н. Ф. Бочкаревой, 2006.

12. Гантмахер Ф. Теория матриц. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.

Moving Approximation Algorithms

I. B. Furtat, cainenash@mail.ru⊠,

ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russian Federation,

Institute of Problems of Mechanical Engineering, RAS, St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: Furtat Igor B., D.Sc., Leading Researcher,

ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russian Federation, Institute of Problems of Mechanical Engineering, RAS, St. Petersburg, 199178, Russian Federation,

e-mail: cainenash@mail.ru

Received on October 13, 2016 Accepted on October 21, 2016

The paper describes the moving approximation algorithms for the functions, which have continuous and bounded derivatives of the first or higher orders. Firstly, Lagrange mean theorem is generalized for the equal and not equal steps. Additionally, Lagrange mean theorem is generalized for the reduced time approximation. Estimations of the residuals in the generalized Lagrange theorems are proposed. Secondly, we consider application of the generalized Lagrange theorems for the design moving approximation algorithms. It is demonstrated, that an error approximation depends on the appropriate residual in the generalized Lagrange theorems. Thirdly, we obtain results which allow us to compensate for an error approximation with a given accuracy. This fact is achieved due to a feedback compensation for the error approximation by using the derivative observers. The values of the time approximation and estimates of the approximation errors are presented. Simulations demonstrate that an approximation of the smooth functions by using algorithms with a compensation for the approximation error is better than an approximation without a compensation for the approximation error. If an approximated function has discontinuities in derivatives, it is recommended to use the algorithms without approximation with an error compensation, since the value of the function at the output of the observer in the derivative points of the discontinuity can be quite large.

Keywords: moving approximation, Lagrange mean value theorem, derivative observer

Acknowledgements: The results of Sections 3 and 5 were obtained with support of the Russian President's grant (\mathbb{N}_{2} 14.W01.16.6325-MD (MD-6325.2016.8)). Section 2 results were obtained by IPME RAS with support of the Russian Science Foundation (Project \mathbb{N}_{2} 14-29-00142). Other studies were supported in part by a grant from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project \mathbb{N}_{2} 14.Z50.31.0031) and a grant from the Government of the Russian Federation (project number 074-U01).

For citation:

Furtat I. B. Moving Approximation Algorithms, *Mekhatronika*, *Avtomatizatsiya*, *Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 147–158.

DOI: 10.17587/mau.18.147-158

References

1. **Ljung L.** *System identification — Theory for the User.* Prentice-Hall, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 1999, 609 p.

2. Xia X. Global Frequency Estimation Using Adaptive Identifiers, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 2002, vol. 47, pp. 1188–1193.

3. **Marino R., Tomei P.** Global Estimation of n Unknown Frequencies, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 2002, vol. 47, pp. 1324–1328.

4. **Bobtsov A. A., Pyrkin A. A.** The compensation of a harmonic perturbation under conditions of a delay in control, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, vol. 47, no. 4, pp. 513–517 (in Russian).

5. **Furtat I. B.** Algoritm kompensatsii neizvestnykh multigarmonicheskikh vozmushcheniy dlya objektov s zapazdyvaniyem po upravleniyu (Compensation algorithm of unknown multiharmonic disturbances for plants with time-delay in control), *Informatsionno-Upravlyayush*chiye Sistemy, 2013, vol. 66, no. 5, pp. 19–25 (in Russian).

6. Goncharov V. L. *Teoriya interpolirovaniya i priblizheniya funktsiy* (Theory of interpolation and approximation of functions), Moscow, GITTL, 1954, 327 p. (in Russian).

7. Demidovich B. P., Maron I. A. Osnovy vychislitel'noy matematiki (Basics of Computational Mathematics), Moscow, Fizmatgiz, 1963, 664 p. (in Russian).

8. **Fikhtengol'ts G. M.** *Kurs differentsial'nogo i integral'nogo is-chisleniya* (Cours of differential and integral calculations), vol. 1, Moscow, FIZMATLIT, 2003, 616 p. (in Russian).

9. **Tsypkin Ya. Z.** Moving approximation and the absorption principle, *Doklady Mathematics*, 1997, vol. 56, no. 3, pp. 976–977 (in Russian).

10. **Tsykunov A. M.** Sledyashchiye sistemy dlya lineynykh ob"yektov s zapazdyvayushchim upravleniyem (Tracking systems for linear plants with time-delay in control), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 3, pp. 9–14 (in Russian).

11. **Bukov V. N.** Vlozheniye sistem. Analiticheskiy podkhod k analizu i sintezu matrichnykh sistem, (Imbedded systems. Analytical approach to the analysis and synthesis of matrix systems), Kaluga, Izdatel'stvo nauchnoy literatury N. F. Bochkarevoy, 2006, 720 p. (in Russian).

12. **Gantmacher F. R.** The theory of matrices, *AMS Chelsea Publishing, Reprinted by American Mathematical Society*, 2000, 276 p. (in Russian).

УДК 004.5:004.9:007.52

DOI: 10.17587/mau.18.159-165

В. М. Лохин, д-р техн. наук, проф., cpd@mirea.ru, **С. В. Манько,** д-р техн. наук, проф., cpd@mirea.ru, **С. А. К. Диане,** канд. техн. наук, доц., cpd@mirea.ru, **А. С. Панин,** cryдент, cpd@mirea.ru,

Р. И. Александрова, науч. сотр., cpd@mirea.ru,

Московский технологический университет МИРЭА, Москва

Механизмы самообучения в мультиагентных робототехнических группировках на основе эволюционного леса деревьев классификации*

Рассматриваются различные подходы к решению задач самообучения интеллектуальных автономных роботов с использованием методов построения деревьев и лесов классификации для поиска скрытых закономерностей при анализе массивов сенсорных данных, аккумулирующих опыт работы в условиях неопределенности. Обоснована перспективность применения метода построения лесов классификации для организации процессов самообучения в мультиагентных робототехнических системах (MAPC). Развивается новый подход к реализации самообучения в MAPC, основанный на сочетании методов построения лесов классификации и эволюционных вычислений. Показано, что метод эволюционного леса деревьев классификации может служить конструктивной базой для создания интеллектуальных автономных самообучающихся роботов, совместно функционирующих в составе мультагентной группировки и способных не только самостоятельно накапливать собственные знания, но и обмениваться ими с приобщением к собственному опыту. Приводятся результаты моделирования, подтверждающие эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: автономный робот, мультиагентная робототехническая группировка, интеллектуальная система управления, самообучение, деревья классификации, леса деревьев классификации

Введение

Главный фактор, определяющий функциональные и адаптивные возможности современных и перспективных образцов автономных роботов, связан с применением интеллектуальных технологий управления, основанных на использовании средств и методов обработки знаний. Совокупность знаний, которая априорно закладывается в состав интеллектуальной бортовой системы управления автономным роботом и регламентирует его целесообразное поведение в тех или иных ситуациях, в общем случае может и должна пополняться по результатам самообучения на основе анализа накапливаемого опыта. Исследования, активно проводимые в этой области, со всей убедительностью свидетельствуют о том, что реализация механизмов самообучения позволяет обеспечить существенное расширение адаптивных свойств интеллектуальных автономных роботов, действующих в условиях неопределенности.

Многообразие задач и способов прикладного применения автономных роботов в сочетании с совокупностью соответствующих типов и форм проявления неопределенностей обусловливают возможность различных вариантов организации процессов самообучения.

В связи с этим особый интерес представляет проблематика самообучения автономных роботов,

функционирующих в рамках объединенной группировки, где приобретение новых знаний может осуществляться как за счет их индивидуального формирования, так и путем взаимного обмена.

Данная статья продолжает цикл авторских публикаций, посвященных вопросам группового управления автономными роботами, которые должны обеспечивать совместное решение поставленных прикладных задач, взаимодействуя друг с другом в составе мультиагентных систем [1-7]. В ней рассматриваются различные подходы к решению задач самообучения интеллектуальных автономных роботов с использованием методов построения деревьев и лесов классификации для поиска скрытых закономерностей при анализе массивов сенсорных данных, аккумулирующих опыт работы в различных условиях. Обоснована перспективность применения метода построения лесов классификации для организации процессов самообучения в мультиагентных робототехнических системах (МАРС). Развивается новый подход к реализации самообучения в МАРС, основанный на сочетании методов построения лесов классификации и эволюционных вычислений. Показано, что метод эволюционного леса деревьев классификации может служить конструктивной базой для создания интеллектуальных автономных самообучающихся роботов, совместно функционирующих в составе мультагентной группировки и способных не только самостоятельно накапливать собственные знания, но и обмениваться

^{*} Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 16-29-04379.

ими с приобщением к собственному опыту. Приводятся результаты моделирования, подтверждающие эффективность предложенного подхода.

Возможности и перспективы применения методов построения деревьев и лесов классификации в задачах самообучения автономных роботов

Интеллектуальные и адаптивные свойства робота, предназначенного для работы в условиях неопределенной или изменяющейся обстановки, характеризуются не только (и не столько) его способностью к принятию необходимого управляющего решения на основе имеющихся знаний, сколько возможностью их приобретения в режиме самообучения.



Рис. 1. Обобщенная структура интеллектуальной системы управления автономным роботом с контуром самообучения



гис. 2. Организация процесса самоооучения автономного росота на основе анализа сенсорных данных с помощью метода построения деревьев классификации

При всем многообразии задач самообучения интеллектуальных роботов (включая установление закономерностей внешнего мира, выявление условий эффективного использования собственных функциональных возможностей или синтез алгоритмов управления) главным (а нередко и единственным) источником новых знаний могут служить проводимые наблюдения и накапливаемый опыт. В конечном итоге и та и другая информация аккумулируется в потоках данных, поступающих от бортового комплекса измерительных средств, подсистемы внутренней диагностики или по каналам внешней связи. При этом набор данных, соответствующих каждому определенному моменту времени, представляет собой неявную форму описания текущей ситуации, характеризующейся состоянием среды, робота, стадией выполнения поставленной ему задачи, принятыми решениями по управлению и результативностью их отработки. Анализ сохраняемых наборов данных такого рода предполагает выявление специфических, ранее неизвестных зависимостей между различными параметрами функционирования робота, его внешней среды, окружаюшей обстановки и т.д. с последующим учетом обнаруженных закономерностей при формировании требуемых управляющих воздействий. В этом случае обобщенная структура интеллектуальной системы управления роботом дополняется контуром самообучения (рис. 1).

Эффективным инструментом вывода знаний при обработке больших массивов разнородных данных является метод построения деревьев классификации (деревьев принятия решений), основанный на последовательном разделении множества имеющихся примеров по принципу прироста информации [8, 9]. Полученное в результате дерево решений регламентирует классификацию анализируемых решений в виде системы правил "ЕСЛИ — ТО, ИНАЧЕ", имеющих легко интерпретируемую структуру с точки зрения их последующего использования.

Известные алгоритмы реализации этого метода обладают двумя основными недостатками:

- склонностью к переобучению (что приводит к переусложнению структуры формируемого дерева и снижению обобщающей способности построенной классификации);
- неоптимальностью жадной стратегии наращивания дерева в процессе его построения.

Для устранения перечисленных недостатков применяются различные эвристические приемы.

Проводимые исследования показывают, что применение этого метода открывает широкие перспективы для создания средств самообучения интеллектуальных автономных роботов (рис. 2), обеспечивая возможность повышения их адаптивных свойств за счет приобретения новых знаний, например, о характере собственных перемещений при движении вдоль различных участков местности [7]. При этом в общем случае процесс самообучения должен осуществляться в соответствии с некоторыми целевыми критериями, позволяющими оценить значимость обнаруживаемых закономерностей, выявить (и отсеять) ложные корреляции случайного характера и т.д.

Альтернативный вариант решения задач глубинного анализа данных связан с использованием метода леса деревьев классификации (Random Forest) [10], формируемых независимо по случайной подвыборке со случайным подмножеством доступных параметров. Соответствующая модель принятия решений основана на различных вариантах реализации голосования по всем деревьям в совокупности путем определения усредненного либо наиболее популярного ответа (рис. 3, см. вторую сторону обложки). Главная сильная сторона такой модели заключается в том, что деревья леса, построенные на основе случайных подмножеств данных, имеют различный профиль переобучения, который практически исключается при усреднении выдаваемых ответов. Имеющиеся недостатки определяются громоздкостью модели и более сложной процедурой принятия решений, предполагающей проведение опроса всех деревьев леса.

Специфика метода обусловливает возможность его эффективной реализации на многопроцессорных структурах с привлечением технологии параллельных вычислений (что является навряд ли приемлемым вариантом с позиций принятых подходов к созданию аппаратно-программных средств бортовых систем управления автономными роботами).

Кроме того, метод леса деревьев классификации в его обычном понимании явно не рассчитан на потоковое обучение, которое для робототехники является актуальным в первую очередь (в том числе с точки зрения выявления закономерностей об условиях проходимости рельефа местности непосредственно в процессе движения автономного мобильного робота [7]).

Тем не менее, сам принцип построения леса деревьев классификации по случайным подвыборкам данных тесно коррелирует с идеями организации процессов самообучения автономных роботов, имеющих общую среду функционирования и действующих в составе многоагентной группировки.

В этом смысле несомненный интерес могла бы представлять некая модификация метода леса, удовлетворяющая трем основным требованиям:

- реализуемости в составе бортовых систем управления автономными роботами с учетом принципов построения их программно-аппаратных средств;
- поддержки процедур принятия решений с использованием множества деревьев классификации, формируемых по ходу обработки поступающих сенсорных данных;
- обеспечения возможности самообучения роботов не только за счет обобщения индивидуально приобретаемого опыта, но и путем взаимного обмена накапливаемых знаний.

Метод эволюционных лесов для решения задач самообучения в автономных робототехнических и мультиагентных системах на основе анализа накапливаемых массивов сенсорных данных

Один из перспективных путей решения задач самообучения автономных роботов на основе анализа собираемых сенсорных данных связан с развитием нового подхода, предполагающего формирование леса деревьев классификации с привлечением методов и алгоритмов эволюционного поиска [11].

В этом случае деревья леса рассматриваются в качестве хромосом, одно поколение которых будет обеспечивать появление другого в рамках процесса эволюции, осуществляемой непосредственно в процессе функционирования самообучающейся системы.

Исходная популяция деревьев вида T_t : $(S_t, X_t, Y_t, N_t, F_t)$ (где S_t — случайная выборка примеров; X_t и Y_t — множества входных и целевых параметров; N_t и F_t — структура и полезность дерева) создается по некоторой первоначально накопленной сово-купности примеров.

Каждая следующая популяция образуется из лучших представителей очередного поколения и может включать дополнительные особи, получаемые по обмену между самообучающимися системами.

Отбор лучших особей осуществляется по оценкам их полезности, определяемой точностью соответствующего дерева классификации. (Следует заметить, что общепринятое понятие "точности" дерева решений (классификации) определяется отношением правильно классифицированных и общего числа примеров.)

Принятие решений обеспечивается путем голосования по набору отобранных деревьев текущего поколения.

Таким образом, итерационная процедура, реализующая метод эволюционных лесов для решения задач самообучения автономных роботов и мультиагентных робототехнических систем, предполагает выполнение следующих основных шагов.

1. Переоценка деревьев. На множестве примеров *S'*, полученных с предыдущей итерации, осуществляется оценка полезности (progressive validation [12]) имеющихся деревьев классификации.

Значение полезности определяется как экспоненциальное скользящее среднее:

$$F_{i+1} = F_i d + F_{i+1}^{emp} (1 - d),$$

где F_i — текущее значение полезности; F_{i+1}^{emp} — измеренная на новых примерах точность; d — постоянная, определяющая степень изменчивости параметров и выбираемая из диапазона (0, 1).

При этом под точностью понимается вероятность верной классификации, вычисляемая как отношение правильно классифицированных объектов к их общему числу.

2. Обновление выборки. Все полученные с предыдущей итерации примеры S' добавляются в подвыборку случайному подмножеству деревьев. Для образованной группы деревьев осуществляется пересчет значений в соответствующих полученным примерам листьях.

3. Рекомбинация. Последовательно выбираются n деревьев T_1 : $(S_1, X_1, Y_1, N_1, F_1), T_2$: $(S_2, X_2, Y_2, N_2, F_2),$..., T_n : $(S_n, X_n, Y_n, N_n, F_n)$, на основании которых создается новое дерево T': $(S_1 \cup S_2 \cup ... \cup S_n, X_1 \cup X_2 \cup ... \cup X_n, Y_1, N', (F_1 + F_2 + ... + F_n)/n)$. По-лученное дерево добавляется в выборку.

4. Добавление/удаление вершин дерева. Пропорционально значению функции полезности *F* деревьям назначается максимальное число узлов, которое они могут иметь. Для всех деревьев выполняются операции добавления узла или удаления наименее важного узла до достижения назначенного числа листьев.

Процедуру добавления узла можно определить как поиск такого разбиения одного из листьев, которое максимизирует прирост информации о целевых параметрах *Y*. Удаление узла соответствует поиску предлистовой вершины, обрезание которой даст минимальную потерю итогового прироста информации по обучающей выборке.

5. Добавление/удаление примеров и параметров. Пропорционально значению функции полезности F всем деревьям назначается допустимое число примеров S_i . В случае превышения допустимого для дерева числа примеров наименее значимые из них удаляются. При этом удаление примеров проводится из соображений минимизации изменений значений в листьях дерева.

То же самое выполняется для доступных деревьям параметров *X*. Соответствующая процедура обеспечивает удаление параметров в порядке возрастания их вхождений в структуру дерева.

6. Удаление деревьев. Все деревья, имеющие число примеров, параметров или узлов меньшее, чем определенные пороговые значения, удаляются из выборки.

В общем случае принятие решений на основе формируемого таким образом эволюционного леса осуществляется путем голосования по всем деревьям с определением средневзвешенного ответа. При этом необходимые весовые коэффициенты задаются значениями полезности отдельных деревьев.

На практике процедура принятия решений существенно упрощается за счет исключения из опроса тех деревьев леса, полезность которых не превышает априорно установленного порога.

Следует отметить, что алгоритмическая (и программная) реализация предложенного метода будет обладать существенным числом задаваемых параметров, как, впрочем, и любой эволюционный или генетический алгоритм. Эта особенность, с одной стороны, позволяет обеспечить тонкую настройку алгоритма, а с другой, обусловливает сложность разработки и верификации соответствующего программного обеспечения. Тем не менее, метод эволюционных лесов представляет явный интерес для решения задач глубинного анализа данных и выявления скрытых закономерностей благодаря целому ряду несомненных достоинств, открывающих перспективы его использования как основы создания средств самообучения автономных роботов, в том числе совместно функционирующих в составе мультиагентных систем:

- сочетание возможностей по формированию новых и обобщению поступающих извне знаний, которые представляются в виде деревьев классификации;
- автоматическое ранжирование деревьев классификации по степени их полезности (что позволяет обеспечить быстроту принятия решений за счет опроса ограниченного числа деревьев с наибольшим показателем полезности);
- косвенная фильтрация анализируемых примеров и параметров на шум и нерепрезентативность.

Организация процессов самообучения в автономных роботах и мультиагентных робототехнических системах на основе метода эволюционных лесов

В соответствии с общепринятой концепцией построения интеллектуальных систем управления автономными роботами обязательным элементом их структуры является база знаний, оговаривающих правила целесообразного поведения и предполагаемые закономерности окружающего мира. Очевидно, что объем этих знаний, закладываемых на стадии разработки или предподготовки робота, будет во многом определять его адаптационные возможности, а в конечном итоге и эффективность функционирования в условиях неопределенной среды.

Перспективы повышения адаптивных свойств автономных роботов, оснащаемых интеллектуальной бортовой системой управления, связаны с привлечением средств и методов самообучения для приобретения новых знаний на основе анализа опыта и результатов своего функционирования.

В данном контексте организация процессов самообучения систем управления автономными роботами предполагает необходимость введения интеллектуальной обратной связи, реализующей смысловую интерпретацию поступающего потока разнородной сенсорной информации и включающей в качестве дополнительного структурного элемента модель внешнего мира.

Использование метода эволюционных лесов открывает широкие возможности для решения задач глубинного анализа сенсорных данных, формирования новых и обобщения поступающих извне знаний по ходу функционирования автономных роботов, в том числе действующих в составе объединенных мультиагентных группировок.

Взаимный обмен знаниями как важнейший аспект самообучения роботов в составе мультиагентной системы должен осуществляться по каналам беспроводной сетевой связи.

Одним из наиболее показательных примеров по оценке эффективности применения средств и методов самообучения автономных роботов может служить планирование целенаправленного перемещения мобильной платформы по пересеченной местности с учетом приобретаемых непосредственно в процессе движения знаний о характеристиках проходимости тех или иных типов участков. Проведенные исследования убедительно свидетельствуют, что эффективность функционирования автономного мобильного робота при выходе в заданную целевую точку (по таким показателям, как время и скорость движения, протяженность пройденного маршрута с учетом обхода препятствий и т.д.) удается существенно улучшить за счет повышения уровня адаптации на основе самообучения по методу построения деревьев классификации [7].

В связи с этим крайний интерес и актуальность приобретает вопрос о возможности дополнительного повышения адаптивности автономных роботов со средствами самообучения, реализуемого с использованием метода эволюционных лесов и допускающего взаимный обмен знаниями о характеристиках проходимости различных участков местности при совместной работе в составе многоагентных систем.

Постановка модельного эксперимента по оценке эффективности применения средств самообучения в целях повышения адаптивных возможностей системы управления автономными мобильными роботами, действующими в условиях неопределенности, определяется следующими основными положениями:

- средой функционирования роботов является местность, отдельные участки которой характеризуются различной окраской и проходимостью;
- карта местности считается априорно неизвестной, но подлежит постоянному уточнению с отображением участков местности, наблюдаемых бортовыми телекамерами роботов в процессе движения;
- фактические скорости движения роботов по тем или иным маршрутам изменяются пропорционально показателям проходимости соответствующих участков местности;
- оценки проходимости отдельных участков местности вычисляются по различию задаваемых и фактических значений скоростей движения роботов;
- факт столкновения роботов с непроходимыми элементами ландшафта подтверждается срабатыванием тактильных датчиков;
- параметры окраски и проходимости различных участков

местности сохраняются в базе данных систем управления роботов для последующего анализа и классификации в процессе самообучения;

- классификация, оперативно сформированная в процессе самообучения отдельного робота, может быть привлечена для прогноза показателей проходимости наблюдаемых участков местности на очередном этапе прокладки маршрута;
- планирование целенаправленных перемещений робота осуществляется на основе программной реализации известного алгоритма D* [13, 14], обеспечивающего возможность учета требований по минимизации стоимости формируемого маршрута на основе использования прогнозных показателей проходимости наблюдаемых участков местности;
- выполняемый эксперимент проводится в две стадии, на первой из которых планирование маршрута целенаправленного движения роботов по априорно неизвестной местности осуществляется с привлечением средств самообучения (построенных на базе метода эволюционных лесов), а на второй происходит повторное воспроизведение опыта с подключением возможностей по обмену знаниями как единственному принципиально важному дополнению к организации процессов самообучения роботов в составе мультиагентной системы (рис. 4, см. вторую сторону обложки).

На рис. 5 (см. вторую сторону обложки) приведены фрагменты одного из экспериментов по моделированию целенаправленных перемещений автономных мобильных роботов со средствами самообучения и взаимного обмена выявляемыми знаниями о характеристиках проходимости раз-



Рис. 6. Экспериментальные оценки эффективности применения средств самообучения для адаптации автономных мобильных роботов к априорно неопределенным характеристикам проходимости среды функционирования на основе взаимного обмена знаниями

личных участков местности при работе на общей территории.

Результаты моделирования убедительно свидетельствуют, что эффективность применения средств самообучения для адаптации автономных мобильных роботов к априорно неопределенным характеристикам проходимости среды функционирования существенно возрастает при обеспечении возможностей взаимного обмена приобретаемыми знаниями (рис. 6, a-d).

Заключение

Разработанный метод эволюционных лесов деревьев классификации открывает широкие возможности для решения задач глубинного анализа больших массивов данных применительно к различным приложениям, особое место среди которых занимает робототехника.

Способность к обобщению накопленного опыта, самообучению и прогнозу являются важнейшими характеристиками робототехнической системы, определяющими надежность и качество ее функционирования с учетом необходимой адаптации к условиям неопределенности внешней среды. При работе в составе многоагентных группировок одним из ключевых аспектов самообучения автономных роботов становится организация обмена и взаимодополнения выявленных знаний.

Принципиальная реализуемость механизмов самообучения автономных роботов (в том числе с обменом приобретаемыми знаниями в составе многоагентной группировки) на основе метода эволюционных лесов подтверждается результатами моделирования.

Однако практическое использование развиваемого подхода при создании интеллектуальных систем управления автономными мобильными роботами с самообучением предполагает необходимость исследований по целому ряду фундаментально важных вопросов, главными из которых являются:

- рациональная организация баз данных для хранения накапливаемой сенсорной информации в составе интеллектуальных самообучающихся систем управления;
- механизмы построения ассоциативной памяти для формирования обобщенных образов наблюдаемых объектов, ситуации и явлений на основе комплексного применения технологии нейросетевых структур;
- обобщенные критерии целесообразности функционирования интеллектуальных систем, во многом определяющие предметную составляющую задач самообучения.

Список литературы

1. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Крюченков Е. Н., Кучерский Р. В., Диане С. А. Мультиагентные робототехнические системы: примеры и перспективы применения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 2. С. 22—32.

2. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Принципы построения и проблемы разработки мультиагентных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 3. С. 11—16.

3. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Крюченков Е. Н., Кучерский Р. В., Худак Ю. И. Модели и алгоритмы планирования действий и распределения заданий в мультиагентных робототехнических системах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 5. С. 44—50.

4. Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Диане С. А. Способы представления знаний и особенности функционирования мультиагентных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 1. С. 36–39.

5. Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Диане С. А.К., Трипольский П. Э., Карпов С. А. Модели и алгоритмы оценки численности состава мультиагентных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление № 3, 2014.

6. Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Александрова Р. И., Диане С. А. К. Принципы построения и программноалгоритмическое обеспечение человеко-машинного интерфейса для автономных роботов и мультиагентных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 9. С. 606—614.

7. Лохин В. М., Манько С. В., Александрова Р. И., Диане С. А. К., Панин А. С. Механизмы интеллектуальных обратных связей, обработки знаний и самообучения в системах управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими группировками // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. № 8. С. 545—555.

8. Lior Rokach, Oded Maimon. Data mining with decision trees: theory and applications. World Scientific Pub Co Inc., 2008.

9. XindongWu, Vipin Kumar, J. Ross Quinlan, Joydeep Ghosh, Qiang Yang, Hiroshi Motoda, Geoffrey J. McLachlan, Angus Ng, Bing Liu, Philip S. Yu, Zhi-Hua Zhou, Michael Steinbach, David J. Hand, Dan Steinberg. Top 10 algorithms in data mining // Knowl. Inf. Syst. 2008. N. 14 (1). P. 1–37.

10. Leo Breiman. Random Forests. Machine Learning, October 2001. Vol. 45, Iss. 1. P. 5–32.

11. **Melanie Mitchell**. An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge MA: MIT Press, 1996.

12. **Blum A., Kalai A., Langford J.** Beating the hold-out: bounds for K-fold and progressive cross-validation // Proc. of the 10th Annual Conference on Computational Theory. 1999. P. 203–208.

13. **Stentz A.** Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Environments // Proc. of the International Conference on Robotics and Automation. May 1994. P. 3310–3317.

14. **Stentz A.** The Focussed D* Algorithm for Real-Time Replanning // Proc. of the International Joint Conference on Artificial Intelligence. August 1995. P. 1652–1659.

Self-Learning Mechanisms in the Multi-robot Systems Based on the Evolution Forests and Classification Trees

V. M. Lokhin, cpd@mirea.ru, S. V. Manko, cpd@mirea.ru, S. A. K. Diane, sekoudiane1990@gmail.com⊠,
 A. S. Panin, sasha_panin@mail.ru, R. I. Alexandrova, cpd@mirea.ru,

Moscow State Technical University MIREA, Moscow, 119454, Russian Federation,

Corresponding author: Diane Seku A. K., Ph.D., Associate Professor, Moscow State Technical University MIREA, Moscow, 119454, Russian Federation, e-mail: sekoudiane1990@gmail.com

> Received on May 25, 2016 Accepted on June 14, 2016

The article investigates different approaches to the problem of autonomous robots' self-learning. The knowledge, which a priori is introduced into the on-board control system of an intelligent autonomous robot for control of its expedient behavior in certain situations, should, in general, be supplemented with the results of the self-learning based on the analysis of the accumulated experience. A variety of the autonomous robots' applications in combination with the diversity of the environmental uncertainty types makes possible several options for augmentation of knowledge. The authors employ the construction methods of the classification trees and the decision forests to find the hidden patterns in the arrays of the sensory data, which accumulate the experience, gathered by the robots operating in a complex environment. The prospects of the decision forests construction methods were demonstrated for organization of the self-learning processes in the multi-robot systems (MRS). A new approach to MRS self-learning was developed based on a combination of the decision forests and evolutionary computation methods. It was proved that the method of the evolutionary decision forests can serve as a constructive basis for development of the intelligent self-learning autonomous robots operating together within a multi-robot system. The authors demonstrated that the role of the robotic agents was not confined to accumulation of their own sensory data, but that they were also capable of a knowledge exchange and its incorporation into their personal experience. The results of the model simulation are presented, confirming the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: autonomous robot, multi-robot system, intelligent control system, self-learning, classification trees, evolutionary decision forests

Ackhowledgement: This research was supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of project no. 16-29-04379.

For citation:

Lokhin V. M., Manko S. V., Diane S. A. K., Panin A. S., Alexandrova R. I. Self-Learning Mechanisms in the Multi-robot Systems Based on the Evolution Forests and Classification Trees, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 159–165.

DOI: 10.17587/mau.18.159-165

References

1. Makarov I. M., Lokhin V. M., Manko S. V., Romanov M. P., Kriuchenkov E. N., Kucherskiy R. V., Diane S. A. *Multiagentnye robototekhnicheskie sistemy: primery i perspektivy primeneniya* (Multi-robot systems: application examples and perspectives), *Mekhatronika*, *avtomatizatciya*, *upravlenie*, 2012, no. 2, pp. 22–32 (in Russian).

2. Makarov I. M., Lokhin V. M., Manko S. V., Romanov M. P. *Printcipy postroeniya i problemy razrabotki multiagentnykh robototekhnicheskikh sistem* (Multi-robot systems construction principles and development problems), *Mekhatronika, avtomatizatciya, upravlenie,* 2012, no. 3, pp. 11–16 (in Russian).

3. Makarov I. M., Lokhin V. M., Manko S. V., Romanov M. P., Kriuchenkov E. N., Kucherskiy R. V., Hudak Iu. I. Modeli i algoritmy planirovaniya deistviy i raspredeleniya zadaniy v multiagentnykh robototekhnicheskikh sistemakh (Models and algorithms of task planning and distribution in multi-robot systems), Mekhatronika, avtomatizatciya, upravlenie, 2012, no. 5, pp. 44–50 (in Russian).

4. Lokhin V. M., Manko S. V., Romanov M. P., Diane S. A. K. Sposoby predstavleniya znaniy i osobennosti funktcionirovaniya multiagentnykh robototekhnicheskikh sistem (Ways to represent knowledge and operation issues of multi-robot systems), Mekhatronika, avtomatizatciya, upravlenie, 2014, no. 1, pp. 36–39 (in Russian).

5. Lokhin V. M., Manko S. V., Romanov M. P., Diane S. A. K., Tripolskiy P. E., Karpov S. A. Modeli i algoritmy ocenki chislennosti sostava multiagentnykh robototekhnicheskikh sistem (Models and algorithms of agent number estimation in multi-robot systems), *Mekhatronika, avtomatizatciya, upravlenie,* 2014, no. 3 (in Russian).

6. Lokhin V. M., Manko S. V., Romanov M. P., Alexandrova R. I., Diane S. A. K. Printcipy postroeniya i programmo-algoritmicheskoe obespechenie cheloveko-mashinnogo interfeisa dlia avtonomnykh robotov i multiagentnykh robototekhnicheskikh sistem (Man-machine interface for autonomous robots and multi-agent robotic systems), Mekhatronika, avtomatizatciya, upravlenie, 2016 no. 9 (in Russian).

7. Lokhin V. M., Manko S. V., Alexandrova R. I., Diane S. A. K., Panin A. S. Mehanizmy intellektualnykh obratnykh sviazei, obrabotki znaniy i samoobucheniya v sistemakh upravleniya avtonomnymi robotami i multiagentnymi robototekhnicheskimi gruppirovkami (Intelligent feedback, knowledge processing and self learning in the control systems of autonomous robots and multi-agent robotic groups), Mekhatronika, avtomatizatciya, upravlenie, 2015, no. 9 (in Russian).

8. Lior Rokach, Oded Maimon. Data mining with decision trees: theory and applications. World Scientific Pub Co Inc., 2008.

9. Xindong Wu, Vipin Kumar, J. Ross Quinlan, Joydeep Ghosh, Qiang Yang, Hiroshi Motoda, Geoffrey J. McLachlan, Angus Ng, Bing Liu, Philip S. Yu, Zhi-Hua Zhou, Michael Steinbach, David J. Hand, Dan Steinberg. Top 10 algorithms in data mining, *Knowl. Inf. Syst* - 2008, 14 (1), pp. 1–37.

10. Leo Breiman. Random Forests, *Machine Learning*, October 2001, vol. 45, iss. 1, pp. 5–32.

11. **Melanie Mitchell.** An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge MA: MIT Press, 1996.

12. Blum A., Kalai A., and Langford J. 1999. Beating the hold-out: bounds for K-fold and progressive cross-validation, *Proceedings of the 10th Annual Conference on Computational Theory*, 1999, pp. 203–208.

13. **Stentz A.** Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Envi-ronments, *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, May 1994, pp. 3310–3317.

14. **Stentz A.** The Focussed D* Algorithm for Real-Time Replanning, *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, August 1995, pp. 1652–1659.

В. В. Воробьев, аспирант, gatus86@mail.ru,

Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"

Алгоритмы выбора лидера и кластеризации в статическом рое роботов*

Рассматриваются задачи выбора лидера и кластеризации в группе роботов. Показаны ряд подходов и методов к решению данных задач. Определены важные моменты, которые необходимо учитывать, решая эти задачи. Представлены алгоритмы выбора лидера и кластеризации, которые в разной степени учитывают данные моменты. Проведенные вычислительные эксперименты подтверждают работоспособность алгоритмов.

Ключевые слова: групповая робототехника, выбор лидера, функциональная дифференциация, кластеризация, статический рой

Введение

На сегодняшний момент робототехника является одним из приоритетных направлений исследований. Огромное внимание уделяется такой сфере, как групповая робототехника — обобщенное направление, куда входят роевая, стайная и коллективная робототехники [1]. Основным отличием их друг от друга является использование разных способов организации групп роботов, например, в соответствии со степенью информированности о целях, задачах, с учетом морфологии группы и т.д. [2].

Данный интерес вызван тем, что возможное практическое применение систем, состоящих из множества роботов, огромно: патрулирование [3, 4], разведка [5], диагностика труднодоступных объектов, работа в космосе [6] и т.д. Также привлекательна возможность появления эмерджентных свойств, т.е. свойств, которыми не обладает ни одна из составных частей такой системы.

Одной из фундаментальных задач групповой робототехники является задача выбора лидера в группе роботов [7]. Действительно, существует ряд робототехнических задач, где наличие в группе лидера необходимо. Например, это задачи, которые решаются методами стайной робототехники: от примитивного движения за вожаком до реализации подражательного поведения в целом, которое ведет к появлению сложных комплексов действий, например, в сфере строительства, ухода, оборонительных действий и т.д. [8].

Решение подобной задачи описывается в работе [9], где представлены сразу несколько стратегий выбора лидера, которые, однако, подходят более для вычислительных сетей, нежели для группы роботов. В работе рассматриваются различные топологии сети и алгоритмы выбора лидера для них. Кроме того, представлен и ряд "универсальных" алгоритмов, наиболее интересный из которых YO-YO. Принцип его работы заключается в обмене заранее заданными весами между вычислительными устройствами. Лидером становится устройство с наименьшим весом.

Другой подход к выбору лидера, который разрабатывался специально для групп роботов, описан в работе [10]. В рассматриваемой модели роботы не имеют обшей координатной системы и уникальных идентификаторов, группировка гомогенна. При этом роботы не могут опираться на информацию о вычислениях и сенсорных данных, сделанных ранее. Выбор лидера происходит по принципу близости робота к центру определенной формации, т.е. роботы сначала формируют некий паттерн, который одновременно является чем-то вроде глобальной системы координат, а затем определяются финальные позиции каждого робота. В конце они стараются достичь данных позиций. Тот робот, который окажется ближе всего к центру описанной окружности данной формации, и станет лидером.

Еще один механизм выбора лидера описан в работе [1]. Его суть заключается в том, что робот определяет, за кого проголосовали его соседи. В зависимости от веса кандидата, за которого голосует его сосед, робот может поменять свой выбор и проголосовать за того же кандидата. Особенностью такого подхода является тот факт, что нет необходимости в ведении уникальных идентификаторов роботов, а также то, что они используют только локальное взаимодействие друг с другом. Сам процесс выбора лидера происходит в структуре, называемой статическим роем, — некой фиксированной в определенный момент времени сети, состоящей из роботов, соединенных друг с другом по каналам связи [11].

Как уже было сказано, для решения некоторых задач стайной робототехники необходимо наличие сложных комплексов действий, например, для задачи группового патрулирования. В свою очередь, это предполагает наличие механизма функциональной дифференциации, т.е. распределения ролей в группе роботов. Эту задачу можно свести к задаче кластеризации группы роботов, где каждому кластеру отведена своя роль в выполнении общей задачи.

Механизм кластеризации, реализованный в работах [12, 13], основан на гранулярной конвекции или на эффекте "бразильского ореха". Основная идея работы — группировать роботов по принципу случайного движения вокруг общей точки притяжения и отталкивания между соседями.

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РНФ 16-11-00018 и РФФИ 16-29-04412 офи_м.

В работе [14], которая является идеологическим продолжением работы [15], в основе алгоритма кластеризации, который содержит в себе элементы, используемые в бисекции и балансировке нагрузки в сетях, лежит идея обмена жетонами (token) между роботами. Наличие жетона определяет принадлежность к кластеру.

Подробно описывается процесс кластеризации в работе [2]. Выделяется иерархическая кластеризация, причем иерархия может выстраиваться двумя путями: "сверху-вниз" и "снизу-вверх". Кроме того, предложены алгоритмы создания непересекающихся кластеров постоянного состава как для гетерогенных, так и для гомогенных групп роботов. Рассматриваются проблемы перераспределения роботов между кластерами и динамической кластеризации — процесс инициализации кластеров и их роста.

Отдельно стоит упомянуть работу [1], где решается задача распределения ролей без кластеризации. Здесь роли распределяются в соответствии с топологическим расстоянием от лидера.

Специфика рассмотренных методов заключается в том, что лидером может стать любой робот, в том числе и периферийный, т.е. тот, кто находится на краю группы. В условиях, когда роботы общаются исключительно локально, т.е. только со своими соседями, может возникнуть ситуация, когда время обмена данными с лидером существенно увеличивается. Поэтому важно, чтобы лидером становился робот, который находится близко к центру группы. Другими словами, при решении такой задачи должны учитываться и топологические характеристики группировки, т.е. их взаимное расположение.

1. Постановка задачи

Предположим, что есть некоторая гомогенная группа роботов, представленная в виде статического роя — фиксированной в определенный момент времени структуры, состоящей из роботов, соединенных друг с другом по каналам связи [11]. Каждый робот имеет определенное число каналов связи, при этом связь носит исключительно локальный характер. Пример реализации такой связи описан, например, в работе [16]. Безусловно, это несколько ограничивает возможности обмена данными, однако позволяет работать в таком случае с большим числом роботов, так как реализация связи "все-со-всеми" трудна или полностью невозможна в случае большой численности (от нескольких десятков и более роботов).

При наступлении заранее заданного события, например сигнала извне, группа собирается в статический рой [11]. При этом ни одному роботу не известна ни численность группировки, ни топология статического роя. Необходимо гарантированно перевести группу роботов из состояния статического роя без лидера в состояние, где один из них лидером является. Обязательным условием является то, что лидер должен находиться как можно ближе к центру роя, так как это может минимизировать время обмена данными между роботами на периферии статического роя и лидером. Сам механизм обмена основан на ретрансляции сообщений с помощью соседей.

Более формально задачу выбора лидера можно описать следующим образом: существует рой роботов, число которых *N*, где каждый робот описывается пятеркой

$$V_i = (\alpha, L, C, W, W_{mv}).$$

Здесь α — уникальный идентификатор *V*; *L* — список соседей *V*; *C* — идентификатор робота-лидера, за которого голосует *V*; *W* — вес кандидата *C*; W_{my} — собственный вес *V*. Это похоже на формализацию, предложенную в работе [17], за тем исключением, что введен еще один атрибут W_{my} , который необходим для случая переголосования. Необходимо гарантированно перевести рой из начального состояния

$$S_{swarm} = \{V_1, V_2, ..., V_N\}$$
, где для любого V_i
 $C_i = \emptyset, i = 1, 2, ..., N,$

в состояние

$$S_{flock} = \{V_1, V_2, ..., V_N\},$$
где существует единственный V_i , такой что $C_i = \alpha_i, i = 1, 2, ..., N$, и где для любого V_j
 $C_j = \alpha_i, j = 1, 2, ..., N; j \neq i.$

Гарантированность процесса можно описать следующим образом:

$$|S| = k + 2$$
 для любого *N*,
где $S = \{S_{swarm}, S_1, ..., S_k, S_{flock}\}$ — множество
состояний роя при переходе из S_{swarm} в S_{flock} .

Если интерпретировать рой как граф G, где роботы являются вершинами, а связь с соседями — ребрами, то близость лидера к центру роя определяется следующим образом:

$$d=\frac{s}{r(G)},$$

где *r* — радиус графа *G*; *s* — расстояние от центра графа до робота-лидера.

После выбора лидера и выработки конкретных планов действий необходимо выполнить функциональную дифференциацию, следовательно, группа должна разделиться на M заданных кластеров. Таким образом, необходимо разделить граф G на M подграфов, т. е. найти функцию

$$f_{div}(G) = \{G_1, G_2, ..., G_M\}$$
, такую что
 $g(f_{div}) = T_{div} \le \text{const},$

где f_{div} — функция разделения графа G на M подграфов; $g(f_{div})$ — функция, возвращающая время выполнения f_{div} ; T_{div} — время деления графа G на Mподграфов.

2. Алгоритм выбора лидера

Статический рой роботов в начале работы алгоритма выбора лидера находится в состоянии S_{swarm} , которое характеризуется тем, что ни один робот не является лидером. У каждого робота V вес $W_{my} = 1$, однако ни один робот еще не выбирал лидера, поэтому $C_i = \emptyset$ и W = 0. При этом отдельные роботы, которые находятся на периферии статического роя, могут иметь свободные каналы связи, т.е. длина списка L_i соседей V_i меньше максимальной длины данного списка len_{max} . Технически это означает, что некоторые из каналов локальной связи робота "не видят" соседей. Такие роботы считаются периферийными, и именно они инициируют процесс выбора лидера.

Сам алгоритм выбора лидера можно условно разделить на три стадии: определение весов кандидатов, отбраковка кандидатов, после чего остается только один кандидат, и подтверждение лидерства, необходимое для того, чтобы сообщить кандидату, что весь рой согласен с его лидерством. Частично данный механизм описан в работе [17].

Выявление кандидатов

Процедура выявления кандидатов на лидерство (Алгоритм 1) начинается с того, что периферийные роботы, т.е. роботы, число соседей |L| которых меньше максимальной длины данного списка len_{max} , т. е.

 V_i , такой что $|L_i| < len_{max}$, i = 1, 2, ..., N,

посылают сообщение с весом W_{my} всему списку своих соседей L. Если сосед — не периферийный робот, то он принимает и анализирует данное сообщение и прибавляет полученный W_{my} к своему W_{Lmy} . Анализ необходим для того, чтобы избежать ситуации, когда вес W_{my} прибавляется дважды. Затем роботы, получившие это сообщение, также посылают свой вес W_{Lmy} своим соседям, инициируя процедуру формирования их веса и т. д. Когда робот сформировал свой вес, т. е. обработал все сообщения от своих соседей, он выдвигает свою кандидатуру на лидерство.

Благодаря такому механизму роботы, которые находятся ближе к центру статического роя, будут иметь бо́льшие веса, нежели те, которые на периферии. Следовательно, это позволяет избегать ситуаций, когда лидером становится периферийный робот.

Алгоритм 1. Определение веса кандидата

1. Проверка, является ли робот *V* периферийным. Если это так, то шаг 5. Иначе шаг 2.

2. Если буфер сообщений робота *V* не пуст, и сообщение хранит вес соседа, то шаг 3. Иначе, если все сообщения обработаны, то шаг 5. Иначе продолжать ожидание.

3. Проверка, получал ли уже робот *V* сообщение с весом от этого соседа. Если это так, то шаг 2. Иначе шаг 4.

4. V прибавляет полученный вес к своему: W_{Lmy} : = $W_{Lmy} + W_{my}$. Шаг 2.

5. Отправить свой вес всем соседям, кроме тех, от кого получил сообщение с весом. Периферийные роботы отправляют сообщение с весом всем своим соседям. Шаг 6.

6. И выдвигает свою кандидатуру на лидерство.

Выбор кандидата с наибольшим весом

Как только робот становится кандидатом на лидерство, т. е. его $C = \alpha$, он сообщает об этом своим соседям (Алгоритм 2) специальным сообщением. Если сосед L_i сам не является кандидатом, то он считает лидером робота-кандидата, запоминает его вес $W_i = W$, при этом не меняя свой собственный вес W_{my} . После этого он передает информацию о лидере всем своим соседям, кроме тех соседей, которые ему данную информацию передали, т.е. кроме "родительских" роботов. Это позволяет выстраивать иерархию связей, где все потоки данных направлены от периферии к лидеру, т.е. от "потомков" к "родителям", а все потоки команд — от лидера к периферии, т. е. от "родителей" к "потомкам".

Роботы-соседи также запоминают вес W. Если возникает ситуация, когда принимающий робот является кандидатом или уже считает лидером другого робота, то сравниваются веса этих лидеров W. Робот с меньшим весом лидера присоединяется к роботу с бо́льшим весом. Если веса одинаковы, то лидерство определяется по уникальному идентификатору робота-кандидата α — главным становится робот с бо́льшим его значением. Это необходимо для того, чтобы избежать ситуаций с бесконечным выбором лидера, которые описаны в работе [1].

Таким образом, в рое остается только один лидер, который, однако, еще не знает об этом. Это связано с тем фактом, что лидеру не известна численность и топология роя, поэтому невозможно гарантировать то, что этот лидер — единственный на данный момент. В связи с этим необходима процедура подтверждения, для того чтобы гарантировать наличие только одного лидера.

Алгоритм 2. Отбраковка кандидатов

1. Проверка, является ли робот V кандидатом. Если это так, то шаг 2. Иначе шаг 4.

2. Сформировать вес кандидата $W = W_{mv}$. Шаг 3.

3. Передать всем соседям вес кандидата *W*. Шаг 4.

4. Если буфер сообщений робота V не пуст, и сообщение хранит данные о кандидате, то шаг 5. Иначе шаг 6.

5. Если вес кандидата W_i , за которого голосует робот V, меньше, чем вес кандидата в сообщении $(W_i \le W)$, или если они равны $(W_i = W)$, но идентификатор α_i робота-кандидата меньше, чем идентификатор кандидата в сообщении ($\alpha_i \le \alpha$), то V голосует за кандидата в сообщении. Если он при этом сам был кандидатом, то он перестает им быть. Шаг 4.

6. *V* передает вес и идентификатор кандидата, за кого он голосует, всем соседям, кроме тех, от кого он получил сообщение о данной кандидатуре.

Подтверждение лидерства

Подтверждение лидерства происходит параллельно с предыдущим этапом: любой кандидат, заявляя о своем лидерстве соседям, ждет согласие от них (Алгоритм 3). Робот соглашается с лидерством, если согласны с данным лидером все его соседи, кроме родительских. В случае если у робота есть только родители, то он соглашается с лидерством кандидата, за которого он голосует. Фактически, сначала распространяется опрашивающая волна от лидера до периферии роя, а затем волна-ответ идет от периферии к лидеру.

Алгоритм 3. Подтверждение лидера

1. Если у робота V нет соседей, кому он может сообщить о кандидате, то шаг 2. Иначе шаг 3.

2. Передать согласие с лидерством родителям. Шаг 6.

3. Если буфер сообщений робота V не пуст, и сообщение хранит согласие от "потомка", то шаг 4. Иначе шаг 6.

4. Увеличить число согласившихся потомков на 1. Шаг 5.

5. Если все потомки согласились с лидерством, то *V* также соглашается с лидерством и сообщает об этом своим родителям. Иначе шаг 3.

6. Ожидание сообщений.

Потеря лидера

В основе механизма перевыборов лидера лежит правило: если у робота нет "родителя", т. е. ему не-

куда передавать данные, и ему никто не присылает команды, и он не является лидером, то он выдвигает свою кандидатуру на лидерство.

Например, есть рой с N = 25 и максимальной длиной |L| = 4 (рис. 1, *a*, *в*), и из-за технических неполадок или сознательного подавления каналов связи извне робот теряет своего "родителя". Технически это реализовано с помощью таймера, который обнуляется, когда от "родителя" приходит любое сообщение. По его переполнению "потомок" выдвигает свою кандидатуру на нового лидера. Затем повторяется уже известная процедура выбора кандидата с наиболышим весом и подтверждение кандидатуры (рис. 1, *б*).

Аналогичная ситуация наблюдается, если лидер остался, но теряется связь с роботами, которые ретранслируют данные от периферийных роботов. Те, кто потерял "родителей", также выдвинул свою кандидатуру (рис. 1, ϵ), но когда связь с лидером восстановится по альтернативным каналам, они снова проголосуют за старого лидера (рис. 1, d).

3. Задача кластеризации

Суть задачи заключается в необходимости функциональной дифференциации ролей в группе, т. е. лидер, определив необходимые роли, распределяет их между членами группы. Решение этой задачи осуществляется поэтапно: лидер формирует зачатки кластера и, при необходимости, передает информацию о дальнейшей кластеризации. Затем в каждом кластере выбирается свой лидер, который уже имеет информацию о том, надо ли делиться дальше. Если такая необходимость есть, то процесс повторяется [18].

Непосредственно алгоритм кластеризации представляет собой несколько процедур деления/выбора лидера. Их число зависит от числа кластеров, на которые необходимо поделить рой, и числа соседей у робота-лидера, которым он может отправить сообщение о начале кластеризации.

Старт процедуры инициируется сообщением, которое отправляет робот-лидер своим соседям. При этом если число соседей больше или равно числу кластеров, на которые рой необходимо разделить, то робот-лидер произвольно выбирает, кому он отправит данное сообщение. Каждому из выбранных соседей сообщается уникальный номер кластера. В свою очередь, эти роботы отправляют такое же сообщение с уникальным номером кластера своим соседям и т.д. Если робот уже принадлежит какому-либо кластеру, то он не может принимать сообщения от частей с другим уникальным номером,



Рис. 1. Переголосование. Толстой линией выделен лидер

что позволяет закончить работу алгоритма разделением роя на заданное число частей.

В случае если разделить группу необходимо на части, число которых больше, чем число соседей робота-лидера, то выполнение алгоритма начинается так же, как если бы они были равны — лидер делит группу на число кластеров, которое равно числу его соседей. При этом в сообщении о разделении вместе с номером формирующегося кластера хранится информация о том, на сколько частей его необходимо разделить в дальнейшем. После того как рой разделится первый раз, в кластерах инициируется процедура выбора лидера, который вновь запустит кластеризацию на то число частей, которое ему было передано во время первого этапа кластеризации.

Так как неизвестно заранее, какой робот в кластере станет лидером, то информация об этом передается всем роботам в процессе кластеризации.

Лидер в кластере выбирается так же, как это описано в разделе 2. Важной деталью является то, что этот процесс синхронизирован во всем кластере, т. е. все роботы, относящиеся к данному кластеру, начинают процесс выбора лидера одновременно. Это возможно благодаря тому, что роботы могут "впадать в спячку" на заданное время. Время определяется следующим образом: на этапе выбора лидера (раздел 2.2) голосующие за лидера роботы определяют число роботов между ними и лидером, другими словами, определяют расстояние до него. Процесс определения расстояния заключается в следующем: лидер имеет расстояние RL = 0 и передает его своим соседям. Они формируют свое расстояние RN = RL + 1 и передают своим соседям (исключая "родителя") и т. д. до периферийных роботов. Когда осуществляется подтверждение лидерства (раздел 2.3), вместе с подтверждением роботы отправляют свое расстояние до лидера. Лидер выбирает максимальное расстояние R_{max}. Когда начинается процесс кластеризации, лидер передает значения R_{max} всем роботам группы, каждый из которых определяет свое ожидание исходя из собственного расстояния до лидера:

$$T_i = (R_{\max} - R_i)k,$$

где T_i — время ожидания; k — величина, обратная скорости движения сообщения от лидера до периферии; R_{\max} — максимальное расстояние от лидера до периферии; R_i — расстояние робота i до лидера. Определив свою принадлежность к какому-либо кластеру, робот ждет на протяжении времени T_i , а затем начинает процесс выбора лидера.

Алгоритм 4. Алгоритм кластеризации

1. Если робот *V* — лидер, то шаг 2. Иначе шаг 3.

2. Определение числа необходимых делений. Передача соседям номеров кластеров, к которым они принадлежат, и числа последующих делений каждого кластера. Снятие с себя функции лидера. Шаг 3. 3. Если буфер сообщений робота *V* не пуст и сообщение хранит в себе номер кластера и число последующих делений, то шаг 4. Иначе шаг 3.

4. *V* присваивает себе полученный номер кластера и число делений, которые находятся в сообщении, и передает этот номер и число делений дальше, своим соседям, кроме тех, чей номер кластера совпадает с номером кластера *V*. Вычисление времени ожидания *T*. Шаг 5.

5. Ожидание в течение времени Т.

4. Вычислительные эксперименты

Было проведено имитационное моделирование, состоящее из серии вычислительных экспериментов. Входными параметрами модели являлись число агентов N и максимальное число каналов связи агента K, т.е. максимальное число его соседей. Агенты располагались случайным образом. Для каждого N (N = 50, 75, 100...200) и было проведено 100 вычислений. Другими словами, для каждого N определяли среднее значение времени T_{map} , которое необходимо для того, чтобы перевести систему из состояния S_{swarm} в состояние S_{flock} . Кроме того, вычисляли среднее значение отклонения лидера от

центра роя $d = \frac{s}{r(G)}$, проверяли работоспособность функции $f_{div}(G) = \{G_1, G_2, ..., G_M\}$ и определяли T_{div} — время ее выполнения. Также вычисляли средние размеры каждого кластера $G_1, G_2, ..., G_M$.

На рис. 2 показано среднее время работы T_{map} в зависимости от числа роботов N для случая K = 4, а на рис. 3 — для K = 8. T_{map} измеряется в тактах работы алгоритма, каждый из которых состоит из операций приема данных от соседей, их обработки и передачи этих данных соседям. Ромбами отмечается время выполнения первого этапа работы алгоритма, квадратами — второго, треугольниками — третьего. Временная сложность оценивается как O(N).

Ни один вычислительный эксперимент не закончился тем, что лидер выбирался бесконечно, что говорит о некоей статистической достоверности того, что лидер будет гарантированно выбран.



На рис. 4 показано среднее значение отклонения d от центра роя для случая K = 4, а на рис. 5 для K = 8. В среднем отклонение от центра составляло не более 0,25 длины радиуса роя. Это подтверждает тот факт, что алгоритм учитывает требование того, чтобы лидер был близок к центру группы роботов.

Кроме того, промоделирована ситуация для числа каналов связи у робота K = 4, когда в процессе выбора лидера часть из них выбывает из роя, т. е. нарушается топология связей (рис. 6). На рис. 6 квадратами изображена кривая времени при выбывании 25 % роя, ромбами — 50 %, а треугольниками — эталон без выбывания. Роботы начинают выбывать сразу после начала процедуры выборов в течение 5 тактов. Из графика видно, что выбывание 50 %



роя ведет к существенному упрощению топологии роя, что приводит к уменьшению времени выбора. С ситуацией выбывания 25 % дело обстоит иначе — выбывших узлов недостаточно для того, чтобы существенно упростить топологию; наоборот, она усложняется, что ведет к увеличению T_{map} .

На рис. 7 изображено время кластеризации T_{div} для случая K = 4. В T_{div} также входит время выбора лидера в новом кластере.

Размер каждого кластера в процентах от общего размера группы для случая, когда кластеров шесть, показан на рис. 8.







Рис. 7. Время кластеризации:

сплошная линия — 4 кластера, длинная штриховая — 6 кластеров, короткая штриховая — 8 кластеров, пунктирная линия — 10 кластеров



Заключение

В работе были предложены алгоритмы выбора лидера в группе роботов и кластеризации данной группы, которые работают на модели статического роя [11]. В отличие от существующих алгоритмов выбора лидера предлагаемый алгоритм позволяет не просто выбирать лидера, но и учитывать топологию группы, где он выбирается, что ведет к тому, что лидером могут стать только те роботы, которые находятся близко к центру. Кроме того, алгоритм успешно завершает работу и в случаях, когда нарушается топология связей в группе. Если сравнивать время выбора лидера, то алгоритм часто показывает результаты, аналогичные результатам, представленным в работе [1].

Алгоритм кластеризации, необходимый для функциональной дифференциации роботов, также показал стабильную работу, все вычислительные эксперименты завершились удачным разделением на кластеры за конечное время T_{div} .

Таким образом, для модели статического роя предложен механизм для решения задач выбора лидера и функциональной дифференциации с учетом топологии связей в группе.

Список литературы

1. Karpov V., Karpova I. Leader election algorithms for static swarms // Biologically Inspired Cognitive Architectures. 2015. \mathbb{N} 12. C. 54–64.

2. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009. 280 с.

3. **Bina D.** Effective cooperation and scalability in multi-robot teams for automatic patrolling of infrastructures // Coimbra. 2013. 246 c.

 Portugal D., Rocha R. P. Cooperative multi-robot patrol with Bayesian learning // Autonomous Robots. 2016. T. 40. № 5. C. 929–953.
 Tan Y., Zheng Z. Research advance in swarm robotics //

Defence Technology. 2013. T. 9. \mathbb{N}_{2} 1. C. 18–39.

6. **Canepa D., Potop-Butucaru M. G.** Stabilizing flocking via leader election in robot networks // Symposium on Self-Stabilizing Systems. Springer Berlin Heidelberg, 2007. C. 52–66.

7. **Dieudonné Y., Petit F., Villain V.** Leader election problem versus pattern formation problem // International Symposium on Distributed Computing. Springer Berlin Heidelberg, 2010. C. 267–281.

 Карпов В. Э. Коллективное поведение роботов. Желаемое и действительное // Современная мехатроника. Сб. научн. трудов Всероссийской научной школы (22—23 сентября 2011 г., г. Орехово-Зуево, Россия): Труды конференции, 2011. С. 35—51.

9. **Santoro N.** Design and analysis of distributed algorithms. John Wiley & Sons, 2006. 589 c.

10. Chaudhuri S. G., Mukhopadhyaya K. Leader election and gathering for asynchronous fat robots without common chirality // Journal of Discrete Algorithms. 2015. T. 33. C. 171–192.

11. **Карпов В. Э.** Управление в статических роях. Постановка задачи // VII-я Международная научно-практическая конференция "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте" (20—22 мая 2013, г. Коломна, Россия): Труды конференции. В 3-х томах. Т. 2. М.: Физматлит, 2013. С. 730—739.

12. Groß R., Magnenat S., Mondada F. Segregation in swarms of mobile robots based on the Brazil nut effect // 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2009. C. 4349–4356.

13. **Chen J.** et al. Segregation in swarms of e-puck robots based on the brazil nut effect // Proc. of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. 2012. T. 1. C. 163–170.

14. Cruz N. B., Nedjah N., de Macedo Mourelle L. Robust distributed spatial clustering for swarm robotic based systems // Applied Soft Computing. 2016.

15. Di Caro G. A., Ducatelle F., Gambardella L. A fully distributed communication-based approach for spatial clustering in robotic swarms // Proc. of the 2nd Autonomous Robots and Multirobot Systems Workshop (ARMS), affiliated with the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS) (Valencia, Spain, June 5). 2012. C. 153–171.

16. **Карпова И. П.** Псевдоаналоговая коммуникация в группе роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 2. С. 94—101.

17. Воробьев В. В., Московский А. Д. Алгоритм выбора лидера в системах с меняющейся топологией // Пятнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2016 (3—7 октября 2016, г. Смоленск, Россия): Труды конференции. В 3-х томах. Т. 1. Смоленск: Универсум, 2016. С. 149—157.

18. Воробьев В. В. Алгоритм кластеризации коллектива роботов // Третий Всероссийский научно-практический семинар "Беспилотные транспортные средства с элементами искуственного интеллекта" (БТС-ИИ-2016, 22—23 сентября 2016 г., г. Иннополис, Республика Татарстан, Россия): Труды семинара. М: Издательство "Перо", 2016. С. 50—59.

Leader Selection and Clusterization Algorithms in a Static Robot Swarm

V. V. Vorobyov, gatus86@mail.ru⊠,

National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123182, Russian Federation

Corresponding author: **Vorobyov Vitaly V.,** Postgraduate Student, National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123182, Russian Federation, e-mail: gatus86@mail.ru

> Received on November 24, 2016 Accepted on November 30, 2016

The paper presents the problem of clustering and leader selection in a group of robots, using a static swarm model — fixed network at some point in time, consisting of the robots connected to one another via the communication channels. Robots use only local interaction, the topology of the swarm and the number of the robots is not known beforehand. It is proposed to take into account the relative positions of the robots and their neighbors, i.e., their local topology, which is known to them, and allows them, in the long run, to choose their leader out of the robots located close enough to the topological center of the whole group. It is known that the group has peripheral robots — those which have not all the communication channels occupied. They

initiate the leader selection procedure by transmitting its weight to the center of the group. This allows to create there a subgroup of robots, with the biggest weights, one of which becomes the leader. It is considered as an option, when the static topology of the swarm changes, i.e. some robots are eliminated in the process of voting. It is demonstrated that in all these cases the leader selection algorithm succeeds. In addition, a clustering algorithm is proposed to solve the problem of the functional differentiation of robots, which will quickly produce their integration into subgroups. The conducted computing experiments prove the efficiency of the algorithms.

Keywords: swarm robotics, leader selection, functional differentiation, clustering, static swarm, flocking

Acknowledgements: The work was supported by grants of RNF 16-11-00018 and RFBR 16-29-04412 ofi_m

For citation:

Vorobev V. V. Leader Selection and Clusterization Algorithms in a Static Robot Swarm, Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 166-173.

DOI: 10.17587/mau.18.166-173

References

1. Karpov V., Karpova I. Biologically Inspired Cognitive Architectures, 2015, vol. 12, pp. 54–64.
Kaljaev I. A., Gajduk A. R., Kapustjan S. G. Modeli i algoritmy

kollektivnogo upravlenija v gruppah robotov (Models and algorithms of collective management in groups of robots), Moscow, Fizmatlit, 2009, 280 p. (in Russian).

3. Bina D. Effective cooperation and scalability in multi-robot teams for automatic patrolling of infrastructures, Coimbra, 2013, 246 p.

4. Portugal D., Rocha R. P. Autonomous Robots, 2016, vol. 40,

iss. 5, pp. 929–953. 5. Tan Y., Zheng Z. Defence Technology, 2013, vol. 9, iss. 1, pp. 18-39.

6. Canepa D., Potop-Butucaru M. G. Symposium on Self-Stabilizing Systems, Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 52-66.

7. Dieudonne Y., Petit F., Villain V. International Symposium on Distributed Computing, Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 267-281. 8. Karpov V. Je. Sovremennaja mehatronika, Sb. nauchn. trudov

Vserossijskoj nauchnoj shkoly (22-23 sentjabrja 2011g., g. Orehovo-Zuevo, Russian, 2011, pp. 35-51 (in Russian).

9. Santoro N. Design and analysis of distributed algorithms, John Wiley & Sons, 2006, 589 p.

10. Chaudhuri S. G., Mukhopadhyaya K. Journal of Discrete Algorithms, 2015, vol. 33, pp. 171-192.

11. Karpov V. Je. VII International scientific-practical conference "Integrirovannye modeli i mjagkie vychislenija v iskusstvennom intellekte" (20-22 maja 2013, g. Kolomna, Russia), vol. 2, Moscow Fizmatlit, 2013, pp. 730-739 (in Russian).

12. Groß R., Magnenat S., Mondada F. 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009, pp. 4349-4356.

13. Chen J. et al. Proc. of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2012, vol. 1, pp. 163-170.

14. Cruz N. B., Nedjah N., de Macedo Mourelle L. Applied Soft Computing, 2016.

15. Di Caro G. A., Ducatelle F., Gambardella L. Proc. of the 2nd Autonomous Robots and Multirobot Systems Workshop (ARMS), affiliated with the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), Valencia, Spain, June 5, 2012, pp. 153-171.

16. Karpova I. P. Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie, 2016, vol. 17, iss. 2, pp. 94-101 (in Russian).

17. Vorob'ev V. V., Moskovskij A. D. Pjatnadcataja nacional'naja konferencija po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2016 (3-7 oktjabrja 2016, g. Smolensk, Russia), vol. 1, Smolensk, Universum, 2016, pp. 149-157 (in Russian).

18. Vorob'ev V. V. Third All-Russian scientific-practical seminar "Bespilotnye transportnye sredstva s jelementami iskustvennogo intellekta' (BTS-II-2016, 22-23 sentjabrja 2016, Innopolis, Respublika Tatarstan, Russia), Moscow, Pero, 2016, pp. 50-59 (in Russian).

УДК 521.1, 681.51.011

DOI: 10.17587/mau.18.173-179

Э. К. Лавровский, канд. физ.-мат. наук, Е. В. Письменная, канд. техн. наук, НИИ механики МГУ

Управление ходьбой экзоскелета с использованием информации о программных момента*

Построена динамическая модель движения в сагиттальной плоскости для экзоскелета нижних конечностей, интегрированного с человеком-оператором, с учетом его опоры на жесткие невесомые костыли. Модель учитывает также динамику электроприводов. В случае одноопорной ходьбы построен аналитический закон управления этим экзоскелетом, обеспечивающий движение тазобедренного и коленного шарниров в соответствии с их желаемым режимом. Представлены результаты численного моделирования уравнений движения человека в экзоскелете, исследована точность управления.

Ключевые слова: экзоскелетон, опора на костыли, нелинейное моментное управление

Введение

Рассматривается процесс управления экзоскелетом нижних конечностей, надетым на оператора, в режиме плоской одноопорной ходьбы. Оператор имеет дополнительную опору в виде невесомой трости (костылей). Движение анализируется в фазе

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-01-04503.

переноса одной из ног. Математическая модель этого процесса учитывает масс-инерциальные характеристики тела человека, интегрированного с экзоскелетом, силы реакции опоры точечной стопы и аналогичные точечные реакции в точке опоры трости, являющейся как бы продолжением рук. Сенсорная система, размещенная на экзоскелете, обеспечивает измерение углов элементов конструкции с вертикалью в шарнирах, а также их первых производных. В тазобедренных и коленных шарнирах экзоскелета размещены электроприводы, способные обеспечить нужное движение в этих сочленениях. Поэтому математическая модель учитывает не только полные динамические уравнения объекта, но и уравнения движения электроприводов. Задающим воздействием на систему управления экзоскелетом являются программные моменты в шарнирах, которые соответствуют желаемым движениям по траектории. В статье приводятся результаты моделирования движения человека в экзоскелете на примере комфортабельной ходьбы [1].

1. Уравнения движения аппарата

Для вывода уравнений движения необходимо ввести абсолютную систему координат и обобщенные переменные. На рис. 1 показана схема оператора вместе с аппаратом в абсолютной системе осей *XYZ*, введены обозначения углов α_i , β_i , моментов q_i , u_i (i = 1, 2) в тазобедренных и коленных шарнирах соответственно; в точечных стопах ног в точке (x_{1p}, y_{1p}) опорной ноги приложены силы реакции R_{1x}, R_{1y} ; в стопе переносимой ноги (x_{2p}, y_{2p}) силы реакции, естественно, отсутствуют. Поскольку данное исследование связано, прежде всего, с вопросами использования экзоскелета для ходьбы лиц с патологией в опорно-двигательном аппарате, предполагается, что моменты в стопах обеих ног отсутствуют, но есть опорная трость. Управляющие моменты q_i, u_i развиваются за счет работы электродвигателей постоянного тока с редукторами. Опре-



Рис. 1. Схема экзоскелетона вместе с человеком в движении

деляющими координатами тела являются (x, y) — координаты тазобедренного шарнира, а также углы звеньев аппарата с вертикалью (ψ , α_1 , β_1 , α_2 , β_2). Трость невесома и неизменна по длине; одним своим концом она опирается в фиксированную в абсолютных осях т. *P* на поверхности перемещения, а другим — в фиксированную точку *S* на корпусе (плечо). Угол θ , образованный вертикалью и направлением трости в т. *P* является ее текущей координатой. Точка *S* плеча пусть находится на расстоянии *s* от таза. Силу реакции трости, направления к плечу, обозначим *F*.

Предположим, что желаемым движением человека-оператора является режим комфортабельной ходьбы [1, 2]:

$$x = Vt - \sigma, \ y = h, \ V = L/T, \sigma = L/2; \ x_{1p} = y_{1p} = 0; \ t \in [0, \ T],$$
 (1)

где V — скорость перемещения; T — время переноса ноги в течение одного шага длиной L; h — высота перемещения точки таза над горизонтальной поверхностью (все эти величины постоянны). Движение переносной ноги подчиняется закону [3]

$$x_{2p} = -L\cos(\Omega t), \ y_{2p} = \delta^2 \sin^2(\Omega t), \ \Omega = \pi/T, \quad (2)$$

где δ — некоторая константа, задающая высоту траектории переносимой ноги.

Согласно соотношениям (1), (2) в конце одноопорной фазы углы α_1 , β_1 переходят в α_2 , β_2 и наоборот, т.е. по этим углам выполняется условие периодичности. Потребуем, чтобы аналогичное условие периодичности выполнялось и по углу ψ . Обозначим ξL горизонтальную координату в точке P; ξ — некоторый коэффициент, если $\xi = 1$, то это означает, что трость ставится в ту точку, куда в конце одноопорной фазы в момент t = T придет переносимая нога. Вектор \overline{PS} имеет компоненты ($x - \xi L - ssin\psi$, $y + scos\psi$). Неизменное расстояние l между точками P и S есть

$$I = \sqrt{\xi^2 L^2 + s^2 + x^2 + y^2 + 2\xi s L \sin \psi - 2L\xi x + 2s(y \cos \psi - x \sin \psi)}.$$

Приравнивая друг к другу величины l_0^2 и l_T^2 , отвечающие началу и концу одноопорной фазы, приходим к выражению для начального значения угла ψ в случае его периодического поведения:

$$s\sin\psi(0) = -L\xi. \tag{3}$$

Соотношение (3) позволяет найти постоянное значение l в случае периодического движения, поэтому текущее значение ψ оказывается функцией текущих величин x и y. Предполагается, что полный шаг содержит еще и двуопорную фазу (детали ее здесь не раскрываются), в течение которой, в частности, реализуется и условие периодичности по угловым скоростям. Тем самым, полный шаг оператора — регулярный, периодический. Динамика тела человека вместе с экзоскелетом описывается в обеих фазах ходьбы следующей системой уравнений [1, 2]:

$$M\ddot{x} - K_{r}(\ddot{\psi}\cos\psi - \dot{\psi}^{2}\sin\psi) + \sum_{i=1}^{2} \{K_{a}(\ddot{\alpha}_{i}\cos\alpha_{i} - \dot{\alpha}_{i}^{2}\sin\alpha_{i}) + K_{b}(\ddot{\beta}_{i}\cos\beta_{i} - \dot{\beta}_{i}^{2}\sin\beta_{i})\} = Q_{x}; \quad (4)$$

$$M\ddot{y} - K_{t}(\ddot{\psi}\sin\psi + \dot{\psi}^{2}\cos\psi) + \sum_{i=1}^{2} \{K_{a}(\ddot{\alpha}_{i}\sin\alpha_{i} + \dot{\alpha}_{i}^{2}\cos\alpha_{i}) + K_{b}(\ddot{\beta}_{i}\sin\beta_{i} + \dot{\beta}_{i}^{2}\cos\beta_{i})\} = Q_{v} - Mg; (5)$$

$$J\ddot{\psi} - K_r(\ddot{x}\cos\psi + \ddot{y}\sin\psi) - gK_r\sin\psi = Q_w; \quad (6)$$

$$J_{a}^{*}\ddot{\alpha}_{i} + J_{ab}\ddot{\beta}_{i}\cos(\alpha_{i} - \beta_{i}) + K_{a}(\ddot{x}\cos\alpha_{i} + \ddot{y}\sin\alpha_{i}) + J_{ab}\dot{\beta}_{i}^{2}\sin(\alpha_{i} - \beta_{i}) + gK_{a}\sin\alpha_{i} = Q_{\alpha i}, i = 1, 2; (7)$$

$$J_b \ddot{\beta}_i + J_{ab} \ddot{\alpha}_i \cos(\alpha_i - \beta_i) + K_b (\ddot{x} \cos\beta_i + \ddot{y} \sin\beta_i) - J_{ab} \dot{\alpha}_i^2 \sin(\alpha_i - \beta_i) + g K_b \sin\beta_i = Q_{\beta i}, i = 1, 2.$$
(8)

Здесь обозначено

$$Q_{x} = \sum_{i=1}^{2} R_{ix} - F\sin\theta, \ Q_{y} = \sum_{i=1}^{2} R_{iy} + F\cos\theta;$$
$$Q_{\psi} = \sum_{i=1}^{2} q_{i} - sF\sin(\psi - \theta);$$
$$tg\theta = (L\xi + s\sin\psi - x)/(y + s\cos\psi);$$
$$Q_{\alpha_{i}} = -q_{i} - u_{i} + 2a(R_{ix}\cos\alpha_{i} + R_{iy}\sin\alpha_{i});$$
$$Q_{\beta_{i}} = u_{i} + 2b(R_{ix}\cos\beta_{i} + R_{iy}\sin\beta_{i}), \qquad (9)$$

где g — ускорение силы тяжести; R_{ix} , R_{iy} — силы реакций опоры; 2a и 2b — соответственно длины бедер и голеней; m_a , m_b — их массы; m_t — масса корпуса; r — расстояние центра масс корпуса от таза; a_* , b_* — соответственно расстояния центров масс бедра и голени от таза и коленей ног; J и J_a — моменты инерции, соответственно, корпуса и бедра относительно точки таза; J_b — момент инерции голени относительно колена;

$$M = m_{t} + 2m_{a} + 2m_{b}, J_{a}^{*} = J_{a} + 4m_{b}a^{2};$$

$$K_{a} = m_{a}a_{*} + 2m_{b}a;$$

$$K_{b} = m_{b}b_{*}, J_{ab} = 2m_{b}ab_{*}, K_{r} = m_{t}r.$$

Данные уравнения пригодны для описания как одноопорной, так и двуопорной фаз ходьбы, хотя в дальнейшем они использовались для анализа только одноопорной фазы, когда $R_{2x} = R_{2y} = 0$. Естественно поэтому, что число введенных перемен-

ных здесь переопределено, и координаты таза могут быть выражены через углы опорной ноги:

$$x_{1p} - x = 2a \sin\alpha_1 + 2b \sin\beta_1,$$

$$y - y_{1p} = 2a \cos\alpha_1 + 2b \cos\beta_1,$$
 (10)

причем считается, что $x_{1p} = y_{1p} = 0$. Дважды продифференцированные соотношения (10) отражают этот факт:

$$\ddot{x} + 2a\ddot{\alpha}_{1}\cos\alpha_{1} + 2b\ddot{\beta}_{1}\cos\beta_{1} =$$

$$= 2a\dot{\alpha}_{1}^{2}\sin\alpha_{1} + 2b\dot{\beta}_{1}^{2}\sin\beta_{1},$$

$$\ddot{y} + 2a\ddot{\alpha}_{1}\sin\alpha_{1} + 2b\ddot{\beta}_{1}\sin\beta_{1} =$$

$$= -2a\dot{\alpha}_{1}^{2}\cos\alpha_{1} - 2b\dot{\beta}_{1}^{2}\cos\beta_{1}.$$
(11)

Для того чтобы замкнуть систему уравнений, добавим еще четыре соотношения, связанных с уравнением моментов на валу электродвигателей:

$$nJ_{eng}(\ddot{\psi} - \ddot{\alpha}_i) + (1/n)q_i = C_m I_{qi};$$

$$nJ_{eng}(\ddot{\beta}_i - \ddot{\alpha}_i) + (1/n)u_i = C_m I_{ui}, i = 1, 2.$$
(12)

Здесь C_m — некоторый коэффициент; I_{qi} , I_{ui} — токи в соответствующих тазобедренных и коленных шарнирах. Величины *n* и J_{eng} обозначают, соответственно, коэффициент редукции электродвигателя и его момент инерции. Все управляющие электродвигатели идентичны.

Соотношения (4)—(9), (11), (12) связывают тринадцатью связями 18 неизвестных величин: семь вторых производных, определяющих координаты ($x, y, \psi, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$), реакции R_{1x}, R_{1y} , моменты и силы, приложенные к телу $F, q_i, u_i, i = 1, 2, a$ также токи $I_{qi}, I_{ui}, i = 1, 2$. Для замыкания системы нужны еще пять соотношений, которые определяются алгоритмом управления данной системой.

2. Алгоритм управления по моментам

Управление многозвенными роботами, как правило, строится либо на основе учета воздействия оператора через имеющуюся систему очувствления [4-6], либо с помощью траекторного управления звеньями робота по некоторым желаемым траекториям [2]. Рассматриваемый ниже алгоритм сочетает в себе идеологию обоих методов. Будем считать, что человек-оператор может активно использовать трость, но усилия его мышц нижних конечностей ничтожны (например, ввиду патологий в опорно-двигательном аппарате при параплегии) и способны лишь обозначить желаемую тенденцию перемещения, которая фиксируется силовыми датчиками, многократно усиливается и подается на исполнительные органы (электроприводы в шарнирах). В целом каждый человек стремится двигаться в режиме периодической походки, близкой к комфортабельной. Именно окрестность такой походки и исследуется в дальнейшем в работе.

При решении обратной задачи динамики в случае одноопорной, комфортабельной ходьбы с помощью системы (4)—(11) могут быть найдены требуемые силы F и моменты $\mathfrak{M}(q, u)$ в шарнирах (как функции времени), которые мы будем называть желаемыми и обозначать как F^* , \mathfrak{M}^* . Пусть оператор способен самостоятельно отследить требуемую силу F^* , а отслеживание \mathfrak{M}^* совершается электроприводами на основе следующего алгоритма:

$$\dot{\mathfrak{M}} = \lambda [\mathfrak{M} - \mathfrak{M}^*] + \dot{\mathfrak{M}}^*, \, \lambda < 0, \tag{13}$$

где $\lambda[1/c]$ — некоторый заданный коэффициент. Ставится задача с помощью математического моделирования найти область применимости такого алгоритма и возникающие при этом ошибки исполнения.

Пусть φ — один из межзвенных, управляемых углов экзоскелета, определяемый углами α_i , β_i , ψ , входящими в левые части соотношений (4)—(9), (12). Тогда для любого из управляемых углов φ имеем

$$nJ_{eng}\ddot{\varphi} + (1/n)\mathfrak{M} = C_m I. \tag{14}$$

Подставляя это выражение в соотношение (13), получим

$$nC_m\dot{I} - n^2 J_{eng}\ddot{\varphi} = \lambda [nC_m I - n^2 J_{eng}\ddot{\varphi} - \mathfrak{M}^*] + \dot{\mathfrak{M}}^*.$$

Поскольку угол φ и его производные так же, как и желаемый момент \mathfrak{M}^* , относятся к разряду переменных, относительно медленных в сравнении с токами, полученную формулу можно упростить, заменив ее на приближенную

$$nC_m\dot{I} \approx \lambda [nC_mI - n^2 J_{eng}\ddot{\varphi} - \mathfrak{M}^*].$$

Член с $\ddot{\varphi}$, а также \mathfrak{M}^* в правой части полученного соотношения умножаются на коэффициент λ , который может быть большим по модулю. Поэтому эти члены сохранены. В результате всех этих преобразований получаем следующие пять недостающих системе (4)—(12) соотношений:

$$\dot{I}_{qi} = \lambda [I_{qi} - (nJ_{eng}/C_m)(\ddot{\psi} - \ddot{\alpha}_i) - q_i^*/nC_m];$$

$$\dot{I}_{ui} = \lambda [I_{ui} - (nJ_{eng}/C_m)(\ddot{\beta}_i - \ddot{\alpha}_i) - u_i^*/nC_m]; (15)$$

$$F = F^*, i = 1, 2.$$

Анализируя соотношения (15), отметим, что (при использовании электроприводов с малыми моментами инерции якоря J_{eng}) членами с J_{eng} можно иногда пренебречь. Это упрощает алгоритм управления.

Следует заметить, что истинным управляющим параметром электродвигателей постоянного тока является не сила тока I, а напряжение V. Если на рассматриваемом шаге интегрирования системы (4)—(12), (15) ее решение известно, то напряжение

легко определяется из закона падения напряжения в цепи каждого электропривода:

$$V = nC_e \dot{\varphi} + RI + L_{dv} \dot{I},$$

где C_e — коэффициент противоЭДС, R — сопротивление цепи электропривода, L_{dv} — его индуктивность.

3. Результаты математического моделирования

Численное моделирование проводили в случае среднестатистической [7, 8] модели тела человека. Значения параметра *s*, характеризующего расстояние от таза до плеча человека, принималось равным 0,55 м. Масса экзоскелета считалась равной 20 кг: 5 кг — масса корпуса, по 3,75 кг — масса каждого из бедер и голеней, причем масса всюду предполагалась распределенной равномерно. Паттерн ходьбы определяется такими параметрами, как длина шага L, высота тазобедренного сустава человека *h*, период шага *T*, максимальная высота подъема переносимой ноги δ , коэффициент, определяющий координату абсцисс постановки трости ξ . Эти параметры были выбраны следующими:

$$L = 20,48 \text{ cm}; h = 85,5 \text{ cm};$$

 $T = 1 \text{ c}; \delta = 2 \text{ cm}; \xi = 1,05.$

Моделирование проводили для двух вариантов электроприводов: по упрощенному алгоритму для электропривода № 1 и по полному алгоритму для электропривода № 2. Для привода № 1 были взяты следующие параметры:

$$J_{eng} = 0,0333 \text{ K}\Gamma \cdot \text{CM}^2; \ C_m = 136 \text{ K}\Gamma \cdot \text{CM}^2/\text{A} \cdot \text{c}^2; C_e = 0,014 \text{ B} \cdot \text{c}; \ R = 1 \text{ OM}; L_{dv} = 0,001 \text{ B} \cdot \text{c}/\text{A}, \ n = 800;$$

для привода № 2 —

$$J_{eng} = 1,12 \text{ Kr} \cdot \text{cm}^2; \ C_m = 350 \text{ Kr} \cdot \text{cm}^2/\text{A} \cdot \text{c}^2; C_e = 0,0375 \text{ B} \cdot \text{c}; \ R = 2 \text{ Om}; L_{dv} = 0,03 \text{ B} \cdot \text{c}/\text{A}, \ n = 110.$$

Моделирование выявило сильную зависимость качества решения задачи от задания начальных значений силы тока. Начальные значения по остальным переменным брались соответствующими желаемому комфортабельному режиму. Как правило, при относительно больших значениях коэффициента λ решение при любых начальных данных по токам достаточно быстро выходит на режим движения, на котором управляющие моменты практически сравниваются с желаемыми управляющими моментами. При этом качество всего процесса в целом определяется точностью выхода на желаемую траекторию комфортабельного режима. Если их рассогласование незначительно, то решение на конечной по времени стадии достаточно точно повторяет по кинематике желаемый режим ходьбы.

При моделировании рассматривали следующие три способа задания начальных значений по токам:

1) выбор начальных токов определяется формулой (14), если вместо $\ddot{\phi}$, \mathfrak{M} туда подставляются начальные желаемые величины $\ddot{\phi}^*$, \mathfrak{M}^* ;

вместо
 [¨]

3) задаются нулевые начальные токи. Этот последний способ наиболее близок к ситуации, когда начальные токи выбираются произвольно. Наряду с этим рассматривались и различные варианты задания коэффициента λ:

номинальный вариант λ = -1000 и варианты

 $\lambda = -500$ (вариант "*a*"), $\lambda = -250$ (вариант "б"),

 $\lambda = -100$ (вариант "в"), $\lambda = -50$ (вариант "г").

Представление об ошибках исполнения желаемого режима ходьбы в случае номинального варианта дают координаты положения тазобедренного шарнира x_T , y_T и положение стопы переносимой ноги x_{2T} , y_{2T} в конечный момент времени *T*. На желаемом и реальном режимах в случае способа 1 выбора начальных токов они, соответственно, равны

> $x_T^* = 10,24 \text{ cm}; \ y_T^* = 85,5 \text{ cm};$ $x_{2T}^* = 20,48 \text{ cm}; \ y_{2T}^* = 0 \text{ cm};$ $x_T = 10,50 \text{ cm}; \ y_T = 85,98 \text{ cm};$ $x_{2T} = 20,58 \text{ cm}; \ y_{2T} = 0,47 \text{ cm}.$

Для способов 2 и 3 реальные величины следующие:

 $x_T = 10,53 \text{ cm}; y_T = 85,92 \text{ cm};$ $x_{2T} = 20,65 \text{ cm}; y_{2T} = 0,40 \text{ cm};$ $x_T = 11,09 \text{ cm}; y_T = 81,50 \text{ cm};$ $x_{2T} = 21,22 \text{ cm}; y_{2T} = -3,72 \text{ cm}.$



Рис. 2. Графики перемещения тазобедренного сустава в декартовых координатах:

1 — соответствует способу № 1; 2 — соответствует способу № 2; 3 — соответствует способу № 3; 4 — соответствует желаемому режиму

На ри с. 2, 3 представлены графики при $\lambda = -1000$, описывающие траектории движения тазобедренного сустава и голеностопа переносимой ноги в декартовых координатах для трех различных случаев выбора начальных данных по току. На рис. 4 показаны графики токов в приводах экзоскелета для случая точного выбора начальных данных (способ № 1) при $\lambda = -1000$.

Приведенные данные показывают, что способы выбора начальных значений токов № 1 и № 2 дают



Рис. 3. Графики перемещения голеностопа переносимой ноги в декартовых координатах:

1 — соответствует способу № 1; 2 — соответствует способу № 2; 3 — соответствует способу № 3; 4 — соответствует желаемому режиму



Рис. 4. Графики силы токов в приводах экзоскелета: 1 — ток в приводе коленного шарнира опорной ноги; 2 — ток в приводе тазобедренного шарнира опорной ноги; 3 — ток в приводе коленного шарнира опорной ноги; 4 — ток в приводе тазобедренного шарнира переносной ноги



Гис. 5. Графики желаемого и реального угла наклона корпуса (1 — реальная траектория наклона корпуса; 2 — желаемая траектория наклона корпуса

приблизительно одинаковую и притом разумную точность реализации желаемого режима, но произвольный выбор начальных токов сильно уступает этим двум в качестве. Поэтому дальнейшие исследования проводили в основном в случае точного выбора начальных токов. На рис. 5 показано поведение угла трости $\psi(t)$ на желаемом режиме в этом случае при $\lambda = -1000$. На рис. 6 приведен график силы трости F(t) на желаемом режиме. Отметим, что она всюду неотрицательна, что отвечает физическим условиям процесса.

Качество реализации сильно зависит и от коэффициента λ . Так, например, в случае способа № 2 задания начальных токов в вариантах "*a*"—"*e*" (они обозначены в верхних индексах) аналогичным приведенным выше конечным значениям декартовых координат и составляют

$$x_T^a = 10,81 \text{ cm}; \ y_T^a = 86,34 \text{ cm};$$

 $x_{2T}^a = 20,81 \text{ cm}; \ y_{2T}^a = 0,79 \text{ cm};$
 $x_T^\delta = 11,38 \text{ cm}; \ y_T^\delta = 87,12 \text{ cm};$
 $x_{2T}^\delta = 21,12 \text{ cm}; \ y_{2T}^\delta = 1,53 \text{ cm};$
 $x_T^\theta = 13,01 \text{ cm}; \ y_T^\theta = 89,05 \text{ cm};$
 $x_{2T}^\theta = 22,06 \text{ cm}; \ y_{2T}^\theta = 0,03 \text{ cm}.$

Тем самым, разумная полоса выбора настроечного коэффициента в законе управления есть $\lambda \leq -500$. Все сказанное, разумеется, относится к предложенному выше приближенному отслеживанию желаемых моментов, когда формула (13) заменяется на соотношения (15).



Представленные выше результаты относились к процессу моделирования экзоскелета с приводами № 2. Аналогичные исследования были проведены и с приводами № 1, которые показали эквивалентные по точности исполнения желаемого режима движения при выборе тех же способов задания начальных данных по токам. Диапазон подходящих значений λ здесь несколько шире.

Заключение

1. Построена динамическая модель движения в сагиттальной плоскости для экзоскелета нижних конечностей, интегрированного с человеком-оператором, с учетом его опоры на жесткие невесомые костыли. Модель учитывает также динамику электроприводов постоянного тока.

2. Построен закон управления этим объектом, который формируется исходя из моментов, отвечающих желаемому режиму движения.

3. Исследуется точность работы этого алгоритма при различном задании начальных условий и настроечных коэффициентов алгоритма в случае одноопорной ходьбы. В результате моделирования получено, что достаточно хорошую точность движения обеспечивает выбор начальных значений токов, соответствующих статическому начальному положению объекта на желаемом режиме.

Список литературы

1. Белецкий В. В. Двуногая ходьба. М.: Наука, 1984. 286 с. 2. Лавровский Э. К., Письменная Е. В. Алгоритмы управления экзоскелетоном нижних конечностей в режиме одноопорной фазы ходьбы по ровной и ступенчатым поверхностям // МАУ. 2014. № 1. С. 44—51.

3. Белецкий В. В., Чудинов П. С. Параметрическая оптимизация в задаче двуногой ходьбы // МТТ. 1977. № 1. С. 25—35.
4. Патент 2555801 на изобретение "Аппарат для помощи при ходьбе" / Письменная Е. В., Кузмичев А. В., Аведиков Г. Е., Комаров П. А., Формальский А. М., зарегистрировано в Госреестре 3Ф 09 июня 2015, опубл. 10.04.2015, бюл. № 19.

5. Патент 2364385 RU на изобретение "Носимое вспомогательное устройство, содействующее двигательной активности и управляющая программа" / Й. Санкаи, опубл. 20.08.2009, бюл. № 23. 6. **Patent** US 2016/0030201 A1, "Powered orthotic system for cooperative overground rehabilitation" / A. Zoss, T. Swift, A. Berg, K. Strausser, E. Brendan, опубл. 14.09.2015.

7. **Лавровский Э. К., Воронов А. В.** Определение масс-инерциальных характеристик ноги человека // Физиология человека. 1998. № 2. С. 91—101.

8. Лавровский Э. К., Письменная Е. В. О регулярной ходьбе экзоскелетона нижних конечностей при дефиците управляющих воздействий // РЖБ. 2014. Т. 18, № 2. С. 208—225.

Control of Walking for an Exoskeleton with the Use of Information about the Programmatic Torques

E. K. Lavrovsky, lavrov@imec.msu.ru, E. V. Pismennaya, epismen@yandex.ru⊠, Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation

> Corresponding author: Pismennaya Elena V., Ph.D., Senior Researcher, Institute of Mechanics of Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: epismen@yandex.ru

> > Received on July 30, 2016 Accepted on August 07, 2016

A dynamic model of the motion in the sagittal plane of the lower limbs of the exoskeleton, integrated with a human operator, was created with account of its lean on rigid weightless crutches. This model describes a mockup of the exoskeleton, which is a 5-link system incorporating the knee and hip drives, as well as massless hand supports. The dynamic model is based on the Lagrange equations of the second kind, which, alongside with the kinematic parameters, also includes the reaction support forces of the point feet and weightless crutches. When the parameters of the mathematical model were set, the inertial mass of the body characteristics of the resulting statistical processing of the tomography slices of a certain number of subjects were taken into account. In the model, the crutches are considered as an extension of the human hands, so the force application points of the crutches are the shoulders of the operator. Human reaction in the shoulder joint to the torque of the crutches is considered irrelevant. The model also takes into account the dynamics of the DC electrical drives. The synthesis is based on the method of solving the inverse tasks of the dynamics. Synthesis of the control system was carried out on the example of a flat, single support for comfortable walking. Since it is assumed that an operator has a weakened musculoskeletal system, but workable hands, it is considered that the given influences on the control system of the exoskeleton are the required torques in the hip and knee joints, viewed as a time function, while a person is assigned the function of providing power to the crutches. As a result, an analytical law motion control exoskeleton was designed, which provided locomotion to the hip and knee joints in accordance with the selected desired mode. The synthesized algorithms were applied to the constructed mathematical models and a numerical study of them was conducted. The article presents the results of the numerical simulation and of the investigated precision control.

Keywords: exoskeleton, support on crutches, nonlinear control with joint torques.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 15-01-0453.

For citation:

Lavrovsky E. K., Pismennaya E. V. Control of Walking for an Exoskeleton with the Use of Information about the Programmatic Torques, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no 3, pp. 173–179.

DOI: 10.17587/mau.18.173-179

References

1. **Beletsky V. V.** *Dvunogaia khodba* (Biped walking), Moscow, Nauka, 1984, 286 p. (in Russian).

2. Lavrovsky E. K., Pismennaia E. V. Algoritmy upravleniai ekzoskeletom nizhnix konechnostei v regime odnoopornoi fazy khodby po rovnym i stupenchatym poverkhnostiam. (Control algorithm for lower extremities exoskeleton in the walking regime by flat and step surfaces), Avtomatizatsiya, Upravlenie, Mekhatronika, 2014, no. 1, pp. 44–51 (in Russian).

3. Beletsky V. V., Chudinov P. S. Parametricheskaia optimizatsiia v zadache dvunogoi khodby (Parameter optimization in the problem

of biped walking), *Mechanics of Solid Body*, 1977, no. 1, pp. 25-35 (in Russian).

4. **Patent** 2555801 na izobretenie "Apparat dlia pomothchi pri khodbee" (Patent "Apparatus for help by walking") / Pismennaia E. V., Kuzmichov A. V., Avedikov G. E., Komarov P. A., Formalsky A. M., zaregistrirovano v Gosriestre ZF 09 ijinia 2015, opubl. 10.04.2015, bul. no. 19 (in Russian).

5. **Patent** 2364385 na izobretenie "Nosimoe vspomogatelnoe ustroistvo, sodeistvuiythchee dvigatelnoi aktivnosti i upravliaiuthchaia programma" Ji. Sankaji (Patent "Carry auxiliary equipment for help by moving activity and control program" / Ji. Sankai) opubl. 20.08.2009, bul. no. 23 (in Russian).

6. **Patent** US 2016/0030201 A1, "Powered orthotic system for cooperative overground rehabilitation" / A. Zoss, T. Swift, A. Berg, Strausser K., Brendan E., opubl. 14.09.2015.

7. Lavrovsky E. K., Voronov A. V. Opredelenie mass-inertsialnykx kxarakteristik nogi chelovekaa (Finding of mass-inertia parameters for human legs), *Physiology of Human*, 1998, no. 2, pp. 91–101 (in Russian).

8. Lavrovsky E. K., Pismennaia E. V. O regularnoi khodbe ekzoskeletona nizhnikx konechnosteji pri deficite upravliaiuthchikx vozdeistviji (About regular walking lower extremities exoskeleton at the deficit of control influence), *Russian Journal of Biomechanics*, 2014, vol. 18, no. 2, pp. 208–225 (in Russian).

ДИАГНОСТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК 681.587.72

DOI: 10.17587/mau.18.180-185

А. А. Бошляков, канд. техн. наук, доц., boshlyakov@mail.ru,

В. В. Ковалев, аспирант, maybe78@gmail.com, **В. И. Рубцов**, канд. техн. наук, доц., rubtsov@mail.ru, Кафедра робототехнических систем и мехатроники МГТУ им. Баумана, Москва

Автоматизация диагностики дефектов сканеров оптико-локационных станций. Часть 1

Предлагается метод автоматизированной диагностики дефектов в сканирующих системах на базе синхронных электродвигателей, использующийся для диагностики дефектов сканеров оптико-локационных станций. Разработаны компьютерные модели сканера и приведены дефекты, наиболее часто встречающиеся при серийном производстве изделий данного типа. Ключевые слова: мехатроника, управление электроприводом, диагностика, следящие системы, автоматизация, сканер ОЛС, дефекты

Введение

Сканирующее устройство оптико-локационной станции (ОЛС) представляет собой привод, поворачивающий оптическую ось станции в направлении цели или уменьшения угла рассогласования, принятого от координатора. В одноапертурной системе (рис. 1, *a*, *b*, см. третью сторону обложки) сканер ОЛС представляет собой двухкоординатный привод, обеспечивающий поворот объекта управления. В многоапертурных (рис. 1, б, г, см. третью сторону обложки) системах это привод, обеспечивающий поворот подвеса с полезной нагрузкой. К данным системам предъявляются жесткие требования по точности наведения, т. е. поворота оптической оси станции. При производстве такого рода изделий и их эксплуатации возникает задача их диагностики, так как даже незначительный дефект сканирующего модуля может привести к неисправности системы в целом. Ужесточение конструктивных требований не всегда приводит к желаемому результату, а отсутствие непосредственного разработчика при процедуре контроля, например в условиях удаленного производства, не всегда позволяет точно выявить неисправность.

К наиболее распространенным решениям диагностики приводов [1, 2] в настоящий момент можно отнести вибрационную диагностику, диагностику по току электродвигателя и набирающую популярность нейросетевую диагностику.

Вибрационная диагностика [3—5] — наиболее распространенный метод диагностирования технических систем и оборудования, основанный на анализе параметров вибрации, либо создаваемой работающим оборудованием, либо являющейся вторичной вибрацией, обусловленной структурой исследуемого объекта. При вибрационной диагностике может исследоваться сигнал вибрации как во временной, так и в частотной областях. Сигналом, несущим информацию о состоянии объекта, могут быть виброперемещение, виброскорость и виброускорение. Из дачиков вибрации наиболее часто применяются пьезоакселерометры (вибропреобразователи ускорения). Анализ выпускаемых диагностических систем показал, что в настоящее время нет готовых систем, которые полностью удовлетворяют требованиям промышленных предприятий с точки зрения стоимости и адаптированности к производственным условиям. Система вибродиагностики должна быть максимально специализирована для конкретных машин и оборудования.

Диагностика по току электродвигателя [6—9] основана на применении современных аппаратно-программных устройств, позволяющих создать систему мониторинга состояния электродвигателя на основе обработки токовых диаграмм и анализа спектров с применением современных математических методов. При этом могут быть выявлены дефекты, возникшие в обмотке якоря и щеточно-коллекторном узле, а также в механических системе электропривода и системе возбуждения. Основными недостатками данного метода являются необходимость учета влияния на электрические параметры двигателя параметров питающей сети. характера нагрузки, воздействия внешних электромагнитных полей, переходных процессов в двигателе, а также сложность обработки данных.

При нейросетевой диагностике [10] задачу поиска неисправностей в электроприводах можно рассматривать как нахождение зависимости между признаками неисправности в момент отказа (выходными данными) и видом неисправности (входными данными). При проведении эксперимента на реальном объекте в первую очередь определяются входные данные, необходимые для работы автоматической системы оценки состояния привода, анализируются переходные характеристики привода при различных неисправностях в нем. Набор входных данных, полученный при исследовании электропривода (вектор состояния) отражает минимум, по которому можно определить его состояние. Данные представляют собой последовательность числовых значений-координат переходной характеристики (в векторной форме), снятых через определенные равные промежутки времени. Набор входных данных (вектор состояния привода), полученный из координат переходной характеристики, вводится в компьютер и ставится автоматический диагноз. Недостатком метода является число наблюдений, которые необходимо провести для обучения сети и последующей диагностики. Известен ряд эвристических правил, увязывающих число необходимых наблюдений с размерами сети (простейшее из них гласит, что число наблюдений должно быть в десять раз больше числа связей в сети).

В большинстве случаев указанные методы рассчитаны на работу с существенно менее точными, чем привод сканера, системами и, как правило, требуют использования специализированных стендов.

В данной работе предлагается метод выявления сложнодиагностируемых дефектов в мехатроных системах и, в частности, сканерах ОЛС, предложенный впервые в работе [11]. Метод основан на сопоставлении процессов в диагностируемом сканере с процессами в компьютерной модели сканера, включающей описание набора дефектов. Для выявления сложнодиагностируемых дефектов в мехатронных системах на базе синхронных электродвигателей используются переменные состояния штатной системы управления объектом. Такими данными могут быть: выходы отдельных звеньев корректирующего фильтра (КФ), сигналы рассогласования по координате, скорости и пройденному пути, а также выходы различных нелинейных звеньев в случае их присутствия в системе.

Такой подход избавляет от необходимости применения специализированных диагностических стендов. Информация о состоянии объекта регулирования, его дефектах и необходимых доработках может быть получена путем использования данных штатной системы управления при работе в специализированных диагностических режимах (реакция на ступенчатое воздействие и перемещение объекта регулирования с постоянной скоростью).

Данный метод может быть использован для диагностики широкого спектра устройств, причем он особенно актуален при диагностике сканирующих модулей ОЛС из-за высоких требований к точности изготовления электромеханической части подобных систем.

Математическая модель сканера ОЛС

Для *диагностики сканера* необходимо построение математической модели эталонного сканера ОЛС (под эталонным сканером подразумевается сканер, входящий в состав изделия ОЛС, прошедшего летные испытания), адекватность модели должна быть подтверждена путем сравнения данных моделирования с данными, полученными экспериментально. Также необходимо составить перечень наиболее часто встречаемых дефектов и оценить их влияние на выходные характеристики системы.

Модель диагностируемой системы должна быть построена с учетом характера внешних воздействий, внутренних дефектов и физических параметров, изменение которых приводит к выходу параметров системы за заданные пределы или выводу системы из строя.

Ключевым элементом сканера является синхронный электродвигатель. В модели двигателя необходимо учесть следующие физические параметры двигателя:

- число пар полюсов;
- сопротивление секций фаз обмотки при постоянном токе;
- коэффициент ЭДС, приведенный к фазе (C_e);
- коэффициент момента, приведенный к фазе (C_M);
- момент инерции ротора;
- электромагнитную постоянную времени фазы обмотки.

Двигатель представляет собой магнитоэлектрическую синхронную машину с синусоидальным распределением магнитного поля в зазоре. В настоящее время для коммутации обмоток двигателей переменного тока (т. е. преобразования управляющего воздействия в реальные напряжения на обмотках двигателя) используются два основных подхода. Первый заключается в непосредственном формировании сигналов, пропорциональных фазным токам двигателя в неподвижной системе координат (I_a и I_b) в зависимости от заданного момента и электрического угла. При втором подходе рассчитываются векторы тока и потокосцепления (I_d и I_q) двухфазного двигателя во вращающейся системе координат.

В первом случае для создания электромагнитного момента в двигателе мы управляем непосредственно токами в обмотках статора. Во втором случае необходимо поддерживать постоянным результирующий вектор токов статора I_d и результирующий вектор потокосцеплений I_q (Field Oriented Control) [12, 13] или вычисленное по ним значение электромагнитного момента с последующей коммутацией токов в фазах таким образом, чтобы вычисленное значение момента сравнялось с заданным за минимальное время (Direct Torque Control) [14, 15].

Использование второй схемы управления требует дополнительных координатных преобразований, названных прямым и обратным преобразованиями Парка, а в случае трехфазного двигателя —



Рис. 2. Координатные преобразования в моделях электродвигателя

также и прямого и обратного преобразований Кларка (рис. 2), так как в обмотки двигателей по-прежнему необходимо подавать реальные значения токов/напряжений.

Если в первом случае для управления двигателем достаточно обратной связи по положению ротора, то для второго случая требуется введение обратной связи по току. Поскольку в экспериментальном стенде отсутствует обратная связь по току и управление двигателем осуществляется путем формирования синусоидального напряжения на обмотках двигателя, математическая модель системы строится в неподвижной системе координат *ab*, связанной с обмотками статора.

При построении математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами примем следующие допущения:

- отсутствуют насыщение магнитной цепи, потери • в стали, эффект вытеснения тока;
- обмотки статора симметричны; •
- индуктивность рассеяния не зависит от положе-• ния ротора в пространстве;
- отсутствуют потери в коммутирующих силовых • ключах.

Рассмотрим модель синхронного двигателя с постоянными магнитами в неподвижной системе координат [16]. Учитывая, что в сканере ОЛС используется двухфазный моментный электродвигатель с симметричными обмотками, принимаем, что индуктивности фаз L_a и L_b равны. С учетом $L_a = L_b = L$ получим:

$$U_{a} = Ri_{a} + Lpi_{a} - C_{M}\omega\sin\varphi_{\Im\pi};$$

$$U_{b} = Ri_{b} + Lpi_{b} + C_{M}\omega\cos\varphi_{\Im\pi};$$

$$M = C_{M}[-i_{a}\sin\varphi_{\Im\pi} + i_{b}\cos\varphi_{\Im\pi}];$$

$$J\frac{d^{2}\varphi}{dt^{2}} = M - M_{CT} - \beta\omega - \alpha\omega^{2};$$

$$\varphi_{\Im\pi} = Z_{\mu}\varphi,$$

(1)

где U_a , U_b — напряжения на обмотках двигателя; i_a , i_b — токи в обмотках; R — сопротивления обмоток; L — индуктивность обмотки; Z_n — число полюсов; С_М — коэффициент момента, приведенный к фазе; ω — угловая скорость вращения ротора; φ_{эл} — электрический угол поворота ротора; Ј — момент инерции ротора и нагрузки; М — момент, создаваемый двигателем; в — коэффициент вязкого трения; α — коэффициент вентиляторного момента.

В целях последующей реализации системы уравнений (1) в среде MATLAB Simulink приведем ее к следующему виду:

$$\begin{cases}
i_{a} = \frac{U_{a} + C_{M} \omega \sin \varphi_{\Im \pi}}{R \left(p \frac{L}{R} + 1 \right)}; \\
i_{b} = \frac{U_{b} - C_{M} \omega \cos \varphi_{\Im \pi}}{R \left(p \frac{L}{R} + 1 \right)}; \\
M = C_{M} [-i_{a} \sin \varphi_{\Im \pi} + i_{b} \cos \varphi_{\Im \pi}]; \\
J \frac{d^{2} \varphi}{dt^{2}} = M - M_{CT} - \beta \omega - \alpha \omega^{2}; \\
\varphi_{\Im \pi} = Z_{n} \varphi.
\end{cases}$$
(2)

Заметим, что переменные i_a , i_b , U_a , U_b соответствуют реальным физическим значениям токов и напряжений на фазах двигателя при работе на экспериментальном стенде.

В разработанной модели учитываются разрядность и точность работы датчика обратной связи. В силовой части контроллера управления приводом применяются микросхемы силовых МОП-ключей (полевых транзисторов), объединенных в полный мост, со встроенным драйвером ключей и формирователем защитного интервала. На вход полевых транзисторов усилителя мощности поступает ШИМсигнал, который формируется цифровой управляющей частью контроллера.

В модели учитывается цифровая реализация алгоритма работы системы управления на микроконтроллере, а также цифровая обработка сигналов с датчика обратной связи.

Адекватность полученной модели должна подтверждаться сравнением переменных состояния модели с реальными сигналами сканера (углом поворота ротора и управляющим сигналом) при отработке ими тестовых воздействий: реакции на ступенчатое воздействие и перемещение объекта регулирования с постоянной скоростью.

Блок-схема экспериментального стенда и соответствующая ей блок-схема математической модели сканера представлена на рис. 3. Математическая модель включает:

1) модель ПИД регулятора, описывающая управляющую систему. На вход регулятора подается задание по углу и измеренный угол, на выходе формируется управляющее воздействие;

2) усилитель мощности (УМ). На входе блока угол поворота ротора и управляющее воздействие с помощью описанных выше координатных преобразований пересчитывается в напряжения на обмотках двигателя;



Рис. 3. Экспериментальный стенд и математическая модель сканера ОЛС

3) модель двигателя с нагрузкой. На входе: напряжения на фазах (U_a , U_b), заданный момент инерции нагрузки, внешние воздействия; на выходе: угол поворота ротора и угловая скорость;

4) блок, описывающий дефекты в сканере, которые изменяют момент инерции нагрузки и ее момент сопротивления.

Выход цифрового регулятора в системе управления сканера является эквивалентом момента сопротивления, взятого с обратным знаком. Оценка формы этого сигнала при движении с малой постоянной скоростью позволяет получить данные о неравномерности момента сопротивления в объекте регулирования, что может свидетельствовать о недостатках системы.

Однако для оценки момента сопротивления недостаточно учитывать только среднее значение сигнала управления. Большая неравномерность трения при различных углах вращения может приводить к недопустимым погрешностям регулирования, особенно это заметно при резком изменении этой неравномерности, поэтому помимо среднего значения сигнала управления необходимо учитывать размах его неравномерности.

Особенности моделирования дефектов сканера

Был проведен анализ и составлен перечень наиболее часто встречаемых дефектов, изучено их влияние на выходные характеристики системы. К наиболее типовым сложнодиагностируемым дефектам изделия относятся:

- дисбаланс объекта регулирования;
- момент сопротивления нагрузки вне допуска;
- неравномерность момента трения (из-за деградации смазки подшипника, грязи в шестерне редуктора, низкого качества обработки деталей, неправильной укладки жгутов);
- перекос оси вращения объекта регулирования.

Для автоматизированной диагностики дефектов необходимо иметь возможность вводить дефекты в компьютерную модель сканера и путем сопоставления результатов моделирования и экспериментальных данных выявлять дефекты реальной системы.

• Дисбаланс объекта регулирования

Наиболее часто приходится сталкиваться с дисбалансом механической нагрузки в объекте регулирования. При перемещении объекта регулирования в вертикальной плоскости и дисбалансе нагрузки для движения с постоянной скоростью в разных направлениях регулятору приходится создавать разные по модулю значения момента на двигателе. Эта разница в усилии отражается на форме сигнала управления.

Введение в математическую модель сканера дополнительного момента сопротивления будет влиять на скорость изменения положения ротора. Добиваемся совпадения процессов изменения скорости в компьютерной модели с реальной системой и определяем значения дисбаланса.

• Недостаточный момент сопротивления нагрузки

По значению модуля сигнала управления также можно определять недостаточный момент трения объекта регулирования в системе, сказывающийся на работе системы управления. В этом случае модуль сигнала управления при движении с постоянной скоростью будет меньше или больше номинального значения. К изменению момента сопротивления объекта регулирования может привести недостаточная/избыточная затяжка подшипников, деградация смазки в подшипниках, изменение массы объекта регулирования. В модель этот дефект вводится в виде блока дополнительного момента нагрузки на валу двигателя, зависящего от знака скорости.

• Неравномерность момента трения

Аналогичным образом можно выявить дефекты в редукторе системы. Причиной таких дефектов могут являться посторонний мусор в шестернях либо низкое качество изготовления деталей. В этом случае на определенном участке редуктора случайным образом меняется момент трения, что недопустимо в высокоточных системах.

Для моделирования этого дефекта в модель вводится блок, который в определенном диапазоне перемещения объекта регулирования случайным образом меняет момент трения, что смоделировано блоком белого шума. Входом блока являются показания с датчика угла, выход заводится на вход внешнего момента двигателя с нагрузкой.

• Перекос оси вращения объекта регулирования

Еще один дефект, на который может указывать размах неравномерности — это перекос оси объекта управления. Математически его можно описать как меняющийся по определенному закону и в определенном диапазоне углов (ближе к границам диапазона) момент инерции объекта. Неравномерность момента сопротивления в данном случае имеет повторяющийся характер, однако не такой, как при неравномерности момента трения.

Автоматизированное определение приведенных параметров при анализе данных системы управления и компьютерной модели поможет указать на возможные причины неисправности системы.

Заключение

Метод автоматизированной диагностики дефектов в мехатронных системах на базе синхронных электродвигателей был применен для сканеров ОЛС. Была разработана математическая модель сканера с учетом модели двигателя с нагрузкой, цифровой системы управления, преобразования управляющего сигнала в напряжение на обмотках двигателя, датчика обратной связи и возможных дефектов электромеханической части сканера. Выявлен перечень типовых сложно-диагностируемых дефектов серийных сканеров. Разработаны алгоритмы анализа данных штатной системы управления сканера, позволяющие определять дефекты по форме процессов в штатной системе и автоматизировать процесс диагностики высокоточных приводов сканирующих устройств.

Дальнейшее подтверждение адекватности математических моделей путем проведения исследований на экспериментальном стенде позволит использовать данные алгоритмы при диагностике сканирующих устройств в условиях серийного производства.

Список литературы

1. Коробейников А. Б., Сарваров А. С. Анализ существующих методов диагностирования электродвигателей и перспективы их развития // ЭСиК. 2015. № 1 (26). С. 4—9.

2. **Лукьянов С. И., Кондратьев А. С.** и др. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования // Вестник государственного техического университета им. Г. И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 129–134. 3. Барков А. В., Баркова Н. А. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации // Тр. Петербургского энергетического института повышения квалификации Минтопэнерго Российской Федерации и Института вибрации США. 1999. Вып. 9.

4. Александров А. В., Барков А. В., Баркова Н. А., Шафранский А. А. Вибрация и вибродиагностика судового электрооборудования // Судостроение. 1986.

5. Барков А. В., Баркова Н. А., Борисов А. А. Вибрационная диагностика электрических машин в установившихся режимах работы. URL: http://vibrotek.ru

6. Прахов И. В., Баширов М. Г., Самородов А. В. Анализ взаимосвязи параметров высших гармонических составляющих токов и напряжений, генерируемых электродвигателем электропривода, с режимами работы и характерными повреждениями машинных агрегатов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2011. № 1. С. 62—69.

7. Петухов В. С., Соколов В. А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. 2005. № 1 (31).

8. Самородов А. В., Баширов М. Г., Чурагулов Д. Г. Разработка программно-аппаратного комплекса для оценки технического состояния машинных агрегатов с электроприводом // Электронный журнал "Нефтегазовое дело". 2012. № 6. С. 10–19.

9. **Кузеев И. Р., Баширов М. Г.** Способ диагностики механизмов и систем с электрическим приводом. Патент № 2431152 от 10.10.2011.

10. **Прахов И. В., Баширов М. Г., Самородов А. В.** Повышение эффективности использования искусственных нейронных сетей в задачах диагностики насосно-компрессорного оборудования применением теории планирования эксперимента // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. М.: ОБРАКАДЕМНАУКА, 2011. № 2. С. 14–17.

11. Бошляков А. А., Ковалев В. В., Рубцов В. И. Диагностика высокоточных сканирующих мехатронных модулей — 2012 // Известия ЮФУ, Технические науки. Тематический выпуск. С. 224.

12. Aengus Murray. Transforming motion: field-oriented control of AC motors // International Rectifier. September 27. 2007.

13. **Dong Gan.** Sensorless and Efficiency Optimized Induction Machine Control with Associated Converter PWM Modulation Schemes // Tennessee Technological University. Dec. 2007.

14. **Casadei D., Serra G.** Assessment of direct torque control for induction motor drives // Bulletin of polish academy of sciences. Technical Sciences. 2006. Vol. 54, N. 3.

15. **Thomas G. Habelter.** Direct Torque Control of induction machines using space vector modulation // IEEE Transactions on industry applications. September/October 1992. Vol. 28, N. 5.

16. **Pragasan Pillay, Krishnan R.** Modelling of Permanent Magnet Motor Drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1988. Vol. 35, N_{P} 4.

Automated Fault Diagnostics in the Scanners of the Optical-Location Stations

A. A. Boshlyakov, boshlyakov@mail.ru, V. V. Kovalev, maybe78@gmail.com⊠, V. I. Rubtsov, Bauman State University, Moscow, 105005, Russian Federation

> Corresponding author: Kovalev Vladimir V., Postgraduate Student, Bauman State University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: maybe78@gmail.com

> > Received on July 30, 2016 Accepted on August 07, 2016

This paper presents an automated method for fault diagnostics in the mechatronic modules of the optical-location stations. Apart from the existing methods, the use of an object native control system for the diagnostics purpose is discussed. It allows us not to use an external hardware during the diagnosis process, because all the information concerning the state of a mechanical structure could be acquired from the control loop information (data from the feedback sensors, outputs of the equalized filters, etc.). This data is enough to detect even the smallest mechanical defects. In future automatization of the control loop data analysis will allow even a low-qualified staff to diagnose and eliminate complex failures, critical for the precise mechatronic modules during the serial production. This is extremely important, because even small mechanical defects can influence the tracking precision of a complete system. This method was successfully implemented for the serially produced modules for the optical-location stations. Realization of the described method requires construction of an adequate mathematical model of a mechatronic module. The authors describe development of an ideal system model, including a servo-drive, a control system and additional hardware, such as sensors and servocontroller parameters. A list of typical failures for these types of systems is presented. This list was obtained after experimental diagnostics of over 100 produced units. The authors also describe how these failures can be presented in a mathematical model. An experiment is required to prove the effectiveness of this method by comparison of the model data with the data acquired.

Keywords: mechatronics, servo, servo-drive control, fault diagnostics, FLIR systems, automatization

For citation:

Boshlyakov A. A., Kovalev V. V., Rubtsov V. I. Automated Fault Diagnostics in the Scanners of the Optical-Location Stations, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2017, vol. 18, no. 3, pp. 180–185.

DOI: 10.17587/mau.18.180-185

References

1. Korobeynikov A., Sarvarov A. *ESiK*, 2015, no. 1 (26), pp. 4–9 (in Russian).

2. Lukyanov S., Kondratiev A. Vestnik Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta im. G. I. Nosova, 2014, no. 1 (45), pp. 129–134 (in Russian).

3. Barkov A., Barkova N. Trudy Peterburgskogo Energeticheskogo Instituta Povysheniya Kvalifikatsyi Mintopenergo Rossiyskoy Federatsyi i Instituta Vibratsii SShA, Sankt-Peterburg, 1999, no. 9 (in Russian).

4. Alexandrov A., Barkov A., Barkova N., Shafranskiy V. Vibratsiya i vibrodiagnostika sudovogo elektrooborudovaniya (Vibration and vibration diagnostics of the ship's electrical), Sudostroenie, 1986 (in Russian).

5. Barkov A., Barkova N., Borisov A. Vibratsionnaya diagnostika elektricheskih mashin v ustanovivshihsya rejimah raboty (Vibration di-

agnostics of electrical machines in steady state operation), available at: *http://vibrotek.ru* (in Russian).

6. **Prakhov I., Bashirov M., Samorodov A.** Problemy Bezopasnosti Chrezvychainykh Situatsiy, Moscow, VINITI, 2011, no. 1, pp. 62–69 (in Russian).

7. **Petukhov V., Sokolov V.** *Novosti Elektrotehniki* no. 1 (31), 2005 (in Russian)

 Samorodov A., Bashirov M., Churagulov D. Elektronnyi zhurnal "Neftegazovoe Delo", 2012, no. 6, pp. 10–19 (in Russian).
 Kuzeev I., Bashirov M., Sposob diagnostiki mehanizmov i sys-

9. **Kuzeev I., Bashirov M.**, Sposob diagnostiki mehanizmov i system s elektricheskim privodom, *Patent no. 2431152 ot 10.10.2011* (In Russian).

10. **Prakhov I., Bashirov M., Samorodov A.,** *Transport i Hranenie Nefteproduktov i Uglevodorodnogo Syrya. Obrakademnauka*, 2011, no. 2, pp. 14–17 (in Russian).

11. Boshlyakov A., Kovalev V., Rubtsov V. Izvestiya YUFU, Tehnicheskie nauki, 2012 (in Russian).

12. Aengus Murray. International Rectifier, September 27, 2007.

13. Dong Gan. Tennessee Technological University, Dec. 2007.

14. **Casadei D., Serra G.** Bulletin of polish academy of sciences. Technical Sciences, 2006, vol. 54, no. 3.

15. Thomas G. Habelter. *IEEE Transactions on industry applications*, September/October 1992, vol. 28, no. 5.

16. Pragasan Pillay, Krishnan R. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1988, vol. 35, no. 4.

УДК 66.021.2.065.5:681.516.42

DOI: 10.17587/mau.18.185-191

А. Г. Лютов, д-р техн. наук, проф., lutov1@mail.ru, **А. Р. Ишкулова,** аспирант, aliya.ishkulova@yandex.ru, Уфимский государственный авиационный технический университет

Автоматизированная система экстремального управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с многосекционными анодами

Рассмотрены вопросы управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с многосекционными анодами. Проведен анализ существующих способов управления процессом в ванне с многоанодной системой. Исследовано влияние плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания электролита на равномерность распределения толщины и скорость осаждения покрытия. Процесс нанесения гальванического покрытия рассмотрен как объект автоматизированного управления. Разработана структурная и функциональная схемы системы экстремального управления процессом нанесения гальванического покрытия. Разработан алгоритм управления процессом нанесения гальванического покрытия с помощью предложенной автоматизированной системы экстремального управления в ванне с многосекционными анодами.

Ключевые слова: гальваническое покрытие, равномерность, многосекционный анод, экстремальное управление, структурная схема системы, алгоритм управления

Введение

В настоящее время гальваническая обработка металлических изделий является одним из самых распространенных способов защиты от коррозии, придания поверхности декоративной отделки и необходимых свойств (твердости, износостойкости, электропроводности, теплостойкости и т. д.).

Одним из важнейших показателей качества гальванического покрытия (ГП), оказывающим влияние на его защитные и механические свойства, является равномерность распределения толщины покрытия по всей обрабатываемой поверхности деталей.

Равномерность в большей степени зависит от размеров, форм и взаимного расположения анодов и обрабатываемых деталей в ванне, режима электролиза, состава электролита и перемешивания электролита.

Одним из современных и перспективных направлений в управлении процессом нанесения ГП

в целях улучшения равномерности распределения толщины покрытия является применение многосекционных анодов, которые представляют собой систему анодных секций, состоящих из отдельных металлических пластин одинаковых размеров квадратной формы. Для управления процессом нанесения ГП в ванне с многосекционными анодами предложен ряд способов, а именно:

1) управление расположением анодных секций [1];

2) управление током на каждой отдельной секции в зависимости от удаленности поверхности катода [2];

3) управление длительностью подачи тока на каждую отдельную секцию [3];

4) циклическое включение анодных секций по заранее определенной программе [4];

5) управление режимом реверсирования тока [5].

Основная часть предложенных способов основана на регулировании плотности тока и управлении режимом подачи напряжения на каждую отдельную анодную секцию с учетом геометрических форм катода и свойств электролита. Однако значительное влияние на равномерность распределения толщины покрытия оказывают межэлектродное расстояние и интенсивность перемешивания электролита. Заметим, что интенсивность перемешивания не учитывается и не регулируется ни в одном из предложенных способов.

Таким образом, целью данной работы является исследование влияния плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания электролита на равномерность распределения толщины и скорость осаждения покрытия и разработка структуры автоматизированной системы управления процессом нанесения ГП.

Математическое моделирование и исследование влияния параметров процесса на равномерность и производительность процесса

Исследование влияния таких параметров процесса, как плотности тока, межэлектродные расстояния и интенсивности перемешивания электролита на равномерность распределения толщины ГП, при осаждении покрытия в ванне с многосекционными анодами проводилось с помощью математической модели [6], которая рассчитывает распределение толщины покрытия путем решения уравнения Лапласа

$$\Delta \varphi(x, y, z) = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}$$
(1)

при граничных условиях

$$\begin{split} \varphi_{a} &= \varphi - \eta_{a} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_{S_{a}} = U, \\ \varphi_{k} &= \varphi + \eta_{k} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_{S_{k}} = 0, \end{split}$$
(2)

где Δ — оператор Лапласа; φ — электрический потенциал; S_a , S_k — поверхности анодов и катодов соответственно; U — напряжение в электролизере, которое рассчитывается по формуле

$$U = il\rho; \tag{3}$$

 η_a, η_k — анодное и катодное перенапряжения, определяются по формуле

$$\eta(x, y, z) = \beta i(x, y, z). \tag{4}$$

Здесь *i* — рабочая плотность тока; *l* — расстояние между электродами, β — электродная поляризация:

$$\beta = \frac{RT}{nFi_d},\tag{5}$$

где R — универсальная газовая постоянная; T — температура; n — число электронов, переносимых в реакции; F — число Фарадея; i_d — предельная диффузионная плотность тока:

$$i_d = \frac{mFDC_0}{\delta},\tag{6}$$

здесь D — коэффициент диффузии; C_0 — концентрация разряжающихся частиц; δ — толщина диффузионного слоя.

Коэффициент диффузии *D* и толщина диффузионного слоя б рассчитываются по следующим формулам:

$$D = \frac{M_p RT}{nF^2};\tag{7}$$

$$\delta = 0,26 \sqrt{\frac{xv}{U_0}} \sqrt[3]{\frac{D}{v}}, \qquad (8)$$

где M_p — молярная электрическая проводимость; x — расстояние от края электрода; v — кинематическая вязкость электролита; U_0 — скорость потока.

Для оценки равномерности распределения покрытия используется коэффициент равномерности, который определяется по следующей формуле:

$$K(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{h_{\min}(t)}{h_i(x, y, z, t)},$$

где h_{\min} — минимальная толщина покрытия; h_i — толщина покрытия в точке (x, y, z) поверхности катода:

$$h_i = \frac{i(x, y, z) \Im \tau \mathrm{BT}}{d} \,.$$

Здесь Э — электрохимический эквивалент; τ — продолжительность процесса осаждения; ВТ — выход металла по току; d — плотность металла; i(x, y, z) — плотность тока в точке (x, y, z) на поверхности детали, которая рассчитывается по следующей формуле:

$$i(x, y, z) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi(x, y, z)}{\partial n},$$

где ρ — удельное электросопротивление электролита; $\varphi(x, y, z)$ — потенциал электрического поля в точке (*x*, *y*, *z*) поверхности катода; *n* — направление внешней нормали к поверхности катода.

В результате проведенных исследований получены графики зависимости коэффициента равномерности



Рис. 1. График зависимости коэффициента равномерности от плотности тока



Рис. 2. График зависимости коэффициента равномерности от межэлектродного расстояния



от плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания электролита, представленные на рис. 1, 2 и 3 соответственно.

Из графиков видно, что коэффициент равномерности нанесения ГП экстремально зависит от плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания электролита и принимает максимальное значение при определенных значениях перечисленных параметров. Кроме того, плотность тока, межэлектродное расстояние и интенсивность перемешивания оказывают влияние на скорость осаждения ГП (графики зависимости представлены на рис. 4, 5 и 6 соответственно).

Таким образом, разработка автоматизированной системы экстремального управления процес-



Рис. 4. График зависимости длительности осаждения 10 мкм никелевого покрытия от межэлектродного расстояния



Рис. 5. График зависимости длительности осаждения 10 мкм никелевого покрытия от плотности тока





сом нанесения ГП, которая обеспечивала бы нахождение и поддержание максимального значения коэффициента равномерности ГП в условиях действия возмущений процесса, является важной и актуальной задачей, позволяющей добиться качественного улучшения равномерности распределения толщины ГП.

Автоматизация системы экстремального управления процессом нанесения ГП

Рассмотрим процесс нанесения ГП как объект автоматизированного управления (рис. 7). Входными координатами (U) — управляющими воздействиями, обеспечивающими желаемое поведение процесса нанесения ГП, — являются плотность тока (u_1) , межэлектродное расстояние (u_2) и интенсивность перемешивания электролита (u_3) . Кроме того, входными величинами процесса нанесения ГП являются геометрические формы электродов (u_4) , температура (u_5) и уровень электролита (u_6) .

На процесс оказывают влияние также внешние возмущающие воздействия (**F**), такие как изменение концентрации компонентов (f_1), проводимости (f_2) и вязкости электролита (f_3) в процессе осаждения ГП.



Рис. 7. Представление технологического процесса нанесения ГП в ванне с многосекционными анодами как объекта автоматизированного управления



Выходными координатами процесса (**Y**) — управляемыми параметрами — являются катодная плотность тока (y_1) , межэлектродное расстояние (y_2) , интенсивность перемешивания (y_3) , длительность процесса (y_4) .

Рассмотрим построение системы управления процессом нанесения ГП в ванне с многосекционными анодами.

Решение задачи управления процессом имеет определенные трудности, связанные со сложностью контроля распределения толщины покрытия в процессе осаждения. Существуют приборы для контроля толщины покрытия в процессе осаждения [7—11], но они не позволяют определить распределение толщины покрытия по всей поверхности и обладают малой точностью. По этой причине в данной работе предлагается система управления процессом нанесения ГП с принципом управления по возмущению с использованием математической модели. Структурная схема системы экстремального управления процессом нанесения ГП представлена на рис. 8.

На вход системы поступает информация о начальных значениях **X** параметров процесса, о возмущающих воздействиях **F**, а также информация о геометрических формах катода A и заданная толщина покрытия h_3 .

Задающее устройство, в соответствии с начальными значениями параметров процесса, устанавливает значения G регулируемых величин, корректирование которых осуществляется в блоке управления, на основании информации U о значениях параметров процесса в точке экстремума коэффициента равномерности.

Экстремум коэффициента равномерности определяется в результате совместного использования алгоритма поиска экстремума [12], осуществляющего определение значений плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания электролита, при которых достигается максимум коэффициента равномерности, и математической модели процесса нанесения ГП, которая рассчитывает распределение толщины покрытия по поверхности катода на основе системы уравнений (1)—(8).

> Блок управления, в свою очередь, формирует сигналы **Q** управления исполнительным механизмам, с помощью которых происходит управление процессом.

В системе имеются четыре контура управления:

- контур управления током;
- контур управления расположением анодных секций и межэлектродным расстоянием;
- контур управления интенсивностью перемешивания электролита;
 контур поддержания температуры электролита.

В обратной связи всех контуров управления располагаются: блок датчиков, включающий в себя датчики температуры, уровня, проводимости, вязкости И концентрации компонентов электролита: блок математической модели процесса нанесения ГП; блок алгоритма поиска экстремума. Функциональная схема системы экстремального управления процессом нанесения ГП представлена на рис. 9.



Рис. 9. Функциональная схема системы управления процессом нанесения ГП

Алгоритмизация системы экстремального управления процессом нанесения ГП в ванне с многосекционными анодами

Алгоритм работы системы экстремального управления процессом нанесения ГП в ванне с многосекционными анодами (рис. 10) состоит из следующих этапов:

1) ввод оператором начальных значений **X** плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания электролита, изображения обрабатываемой детали A и требуемой толщины покрытия h_3 ;

2) опрос датчиков температуры, уровня, проводимости, вязкости и концентрации компонентов электролита;

3) расчет распределения толщины ГП с помощью математической модели, значения коэффициента равномерности K и минимальной толщины h_{\min} ;

4) поиск экстремума коэффициента равномерности и определение значений плотности тока (i_3) , межэлектродного расстояния (l_3) и интенсивности перемешивания электролита (u_3) в точке экстремума;

5) установка значений параметров процесса в соответствии с определенными на предыдущем этапе значениями;

6) запуск процесса нанесения ГП путем подключения электродов к источнику тока и погружения в электролит;

7) выполнение операций опроса датчиков, расчета распределения толщины ГП, поиска экстремума коэффициента равномерности, регулирования параметров процесса и проверка выполнения условия достижений минимальной толщины покрытия h_{\min} заданной толщины h_3 , при котором происходит переход на следующий этап;

8) останов процесса нанесения ГП, извлечение электродов из ванны и отключение питания.

Оценка эффективности применения системы экстремального управления процессом нанесения ГП в ванне с многосекционными анодами

Оценку эффективности применения предложенной автоматизированной системы экстремального управления проводили на примере процесса





Рис. 11. Конфигурация и размеры катода

нанесения хромового покрытия на внешние поверхности катода (рис. 11), в гальванической ванне размерами $20 \times 20 \times 30$ см, с многосекционными анодами, которые представляют собой систему из 25 анодных секций размерностью 5×5 , состоящих из квадратных пластин одинакового размера 3×3 см и расстоянием между секциями 1 см. Расчет распределения толщины наносимого покрытия проводили при следующих параметрах:

Состав электролита, г/л	CrO ₃ (230270),
	H ₂ SO ₄ (2327)
Плотность тока, А/дм ²	4555
Интенсивность перемешивания	
электролита. см/с	545
Температура электролита, °С	55
Удельная электропроводность, $Om^{-1} \cdot cm^{-1}$.	0,0166
Выход по току, %	35
Длительность нанесения покрытия, мин	20

Исследования распределения толщины покрытия проводили при управлении плотностью тока, межэлектродным расстоянием и интенсивностью перемешивания электролита в процессе осаждения покрытия и без управления, в ванне с многосекционными анодами, расположенными в одной плоскости, и с выровненным межэлектродным расстоянием. В результате проведенных исследований распределения толщины покрытия были получены следующие значения коэффициентов равномерности:

- при осаждении покрытия в ванне с расположением анодных секций в одной плоскости с управлением параметрами процесса — 0,51;
- при осаждении покрытия в ванне с расположением анодных секций в одной плоскости без управления параметрами процесса — 0,32;
- при осаждении покрытия в ванне с выровненным межэлектродным расстоянием с управлением параметрами процесса — 0,48;
- при осаждении покрытия в ванне с выровненным межэлектродным расстоянием без управления параметрами процесса — 0,30.

Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать вывод, что применение автоматизированной системы экстремального управления процессом нанесения ГП для улучшения равномерности распределения толщины осаждаемого покрытия является целесообразным.

Заключение

Проведенные в данной работе расчеты показали целесообразность и эффективность применения

предложенной автоматизированной системы экстремального управления процессом нанесения ГП для повышения равномерности распределения толщины ГП.

Предложенная автоматизированная система экстремального управления процессом нанесения ГП содержит четыре контура регулирования, в обратной связи которых находятся датчики температуры, уровня, проводимости, вязкости и концентрации компонентов электролита, а также математическую модель процесса и алгоритм поиска экстремума, что позволит более эффективно осуществлять управление параметрами процесса, учитывать и компенсировать влияние возмущающих факторов, таких как изменение концентрации компонентов, проводимости и вязкости электролита. За счет этого можно значительно повысить показатели качества ГП и готовых изделий, увеличить производительность гальванической линии, сократить расход металла и электроэнергии.

Список литературы

1. Литовка Ю. В., Тарураев В. А. Оптимизация гальванической ванны с подвижными анодами // Известия ТулГУ. Серия: Вычислительная техника. Автоматика. Управление. 1997. Т. 1, Вып. 2. С. 41—48.

2. А. с. 1463810 СССР, МКИ4 С 25 D 21/12. Устройство для нанесения гальванических покрытий / Н. Д. Кошевой и др. (СССР). № 4316493/31-02; заявл. 31.08.87; опубл. 30.03.83, бюл. № 9.

3. Литовка Ю. В., Дьяков И. А. Метод расчета потенциалов анодов в многоанодной гальванической ванне // Теоретические основы химической технологии. 1997. Т. 31, № 2. С. 218—221.

4. Соловьев Д. С. Оптимальное управление гальваническими процессами с циклически включаемыми анодными секциями: дис. канд. техн. наук. Тамбов: ТГТУ, 2014. 166 с.

5. Конкина В. В., Соловьев Д. С., Литовка Ю. В. Математическое моделирование и оптимальное управление реверсным режимом нанесения гальванических покрытий в многоанодной ванне // Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2015. № 2. С. 7—15.

6. Лютов А. Г., Ишкулова А. Р. Моделирование процесса нанесения гальванических покрытий с учетом геометрических конфигураций электродов // Вестн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2015. Т. 19, № 4. С. 45—48.

7. А. с. 88662 СССР, МПК С25D 21/12. Способ непрерывного контроля толщины гальванического покрытия изделий в ванне и устройство для осуществления способа / Крепс Б. И., Паллей С. С (СССР). № 405626; заявл. 12.10.49; опубл. 01.01.50.

8. А. с. 968590 СССН, VGR G 01 В 7/06/ Устройство для контроля толщины гальванического покрытия в процессе осаждения / Краснопрошина А. А. и др. (СССР). № 3213560/25-28,; заявл. 05.12.80; опубл. 23.10.82, бюл. № 39.

9. А. с. 107101 СССР, МПК С25D 21/12. Прибор для непрерывного измерения толщины гальванических покрытий / Эльгард А. М. (СССР). № 558642; заявл. 17.09.56; опубл. 01.01.57.

10. А. с. 119414 СССР, МПК С25D 21/12. Прибор контроля и управления режимами гальванических покрытий / Гинберг А. М. и др. (СССР). № 591223; заявл. 31.01.1958; опубл. 01.01.1959.

11. А. с. 1344822 СССР, МПК С23С 14/54. Способ нанесения вакуумных покрытий сложного состава и устройство для его осуществления / Капустин А. А. и др. (СССР). № 4916093/21; заявл. 31.01.1991; опубл. 27.06.1995, бюл. № 38.

12. Лютов А. Г., Ишкулова А. Р. Многомерная система экстремального управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с многосекционными анодами // Вестн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2016. Т. 20, № 2 (72). С. 34—39.

Automated System the Extreme Multidimensional Management of Process Plating

A. G. Lutov, lutov1@mail.ru, A. R. Ishkulova, aliya.ishkulova@yandex.ru⊠, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450008, Russian Federation

Corresponding author: Ishkulova Aliya R., Postgraduate Student, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450008, Russian Federation, e-mail: aliya.ishkulova@yandex.ru

> Received on May 05, 2016 Accepted on September 07, 2016

The paper deals with the process control plating in a bath with multi-section anodes. The analysis of existing methods of process control in the bath with multi-section anodes. The influence of current density, distance between electrodes and electrolyte mixing intensity on the uniformity of coating and performance of the deposition process thickness. Established extreme nature of dependence of the uniformity of the coating on the current density, distance between electrodes and electrolyte mixing intensity. In this paper, the process of plating is considered as a object of automated control. The block diagram of a system of extreme process control plating based on the principle of management on indignation with using a mathematical model. The function chart of the extreme control system plating process in a bath of multi-anodes. In a control system there are four contours of regulation: contour of regulation of tension; contour of management of an arrangement of anode sections and interelectrolyte. In feedback of all contours of regulation settle down: the block of sensors including sensors of temperature, concentration of components of electrolyte, conductivity and level; block of mathematical model of process of putting electroplated coating by means of the developed automated system of an argement in a bathtub with multisection anodes is developed.

Keywords: electroplated coating, multisection anode, extreme management, structural diagram, function diagram, control algorithm

For citation:

Lutov A. G., Ishkulova A. R. Automated System the Extreme Multidimensional Management of Process Plating Management of Process Plating, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2017, vol. 18, no. 3, pp. 185–191.

DOI: 10.17587/mau.18.185-191

References

1. Litovka Y. V., Taruraev V. A. Optimizacija gal'vanicheskoj vanny s podvizhnymi anodami (Optimization of the plating bath with moving anodes), *Izvestija TulGU. Serija: Vychislitel'naja tehnika. Avtomatika. Upravlenie*, 1997, vol. 1, no. 2. pp. 41–48 (in Russian).

2. Koshevoy N. D. e. a. *Ustrojstvo dlja nanesenija gal'vanicheskih pokrytij* [An apparatus for plating], Patent USSR, no. 4316493, 1983.

3. Litovka Y. V., Diakov I. A. *Metod raschjota potencialov anodov v mnogoanodnoj gal'vanicheskoj vanne* (The method of calculating the potential of the anodes in the plating bath abounding), *Teoreticheskie Osnovy Himicheskoj Tehnologii*, 1997, vol. 31, no. 2. pp. 218–221 (in Russian).

4. **Soloviev D. S.** *Optimal'noe upravlenie gal'vanicheskimi processami s ciklicheski vkljuchaemymi anodnymi sekcijami* (Optimal control of electroplating processes to cycle on the anode sections), Publishing house of TSTU, Tambov, dis. of the cand. tech. sciences. pp. 166, 2014 (in Russian).

5. Konkina V. V., Soloviev D. S., Litovka Y. V. Matematicheskoe modelirovanie i optimal'noe upravlenie reversnym rezhimom nanesenija gal'vanicheskih pokrytij v mnogoanodnoj vanne (Mathematical modeling and optimal control of reverse plating regime in bath with multi-section anodes), Vestnik ASTU. Ser.: Management, Computer Science and Informatics, Astrakhan, no. 2, pp. 7–15, 2015. (in Russian). 6. Liutov A. G., Ishkulova A. R. Modelirovanie processa nanesenija gal'vanicheskih pokrytij s uchetom geometricheskih konfiguracij jelektrodov (Modeling plating process based on geometric configurations of electrodes), Vestnik UGATU, Ufa, 2015, vol. 19, no. 4. pp. 45–48 (in Russian).

7. **Kreps B. I.** et al. Sposob nepreryvnogo kontrolja tolshhiny gal'vanicheskogo pokrytija izdelij v vanne i ustrojstvo dlja osushhestvlenija sposoba [A method of continuous control of the thickness of the plating bath products and a device for carrying out the method], Patent USSR, no. 88662, 1950.

8. **Krasnoproshina A. A.** et al. *Ustrojstvo dlja kontrolja tolshiniy gal'vanicheskogo pokrytija v processe osazhdenija* [Device for measuring the thickness of a plating deposition process], Patent USSR, no. 968590, 1980.

9. Jel'gard A. M. Pribor dlja nepreryvnogo izmerenija tolshhiny gal'vanicheskih pokrytij [Device for the continuous measurement of thickness of galvanic coatings], Patent USSR, no. 107101, 1950.

10. **Ginberg A. M.** et al. *Pribor kontrolja i upravlenija rezhimami gal'vanicheskih pokrytij* [Device control and management regimes of galvanic coatings], Patent USSR, no. 591223, 1958.

11. **Kapustin A. A.** et al. *Sposob nanesenija vakuumnyh pokrytij slozhnogo sostava i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija* [Application method of vacuum coating of complex composition and device for its realization], Patent USSR, no. 4916093/21, 1991.

12. Liutov A. G., Ishkulova A. R. *Mnogomernaja sistema jekstremal'nogo upravlenija processom nanesenija gal'vanicheskogo pokrytija v vanne s mnogosekcionnymi anodami* (Multidimensional system of extreme management of process of putting electroplated coating in a bath with multisection anodes), *Vestnik UGATU*, Ufa, 2016, vol. 20, no. 2. pp. 34–39 (in Russian). **Ю. А. Бурьян,** д-р техн. наук, проф., burian@omgtu.ru, **В. В. Шалай,** д-р техн. наук, проф., президент, Омский государственный технический университет,

А. В. Зубарев, канд. техн. наук, генеральный директор, **С. Н. Поляков,** канд. техн. наук, доц., науч. сотр., Научно-производственное предприятие "Прогресс", г. Омск

Динамическая компенсация виброактивных сил в колебательной системе

Рассмотрена активная система виброизоляции, в которой для компенсации динамических сил на основании, возникающих из-за колебаний упругоподвешенной массы с виброактивным элементом, использовано воздействие инерционных сил в противофазе. В качестве компенсатора динамических сил использован электродинамический привод, в котором прямолинейное перемещение ротора с дополнительной массой осуществляется по информации от датчика силы или акселерометра. Рассмотренная в работе активная система виброизоляции с электродинамическим компенсатором может обеспечить эффективное уменьшение передачи усилия на основание от колебаний упругоподвешенной массы на 20...50 Дб в низкочастотном диапазоне частот.

Ключевые слова: виброизоляция, активная система, виброактивные силы, электродинамический компенсатор, датчик силы, датчик перемещения, передаточная функция

Введение

Пассивные системы виброизоляции с различными упругодиссипативными опорами давно и с успехом применяются, например, в судостроении для снижения вибрационной нагрузки на корпус судна. Если высокочастотные составляющие усилий виброактивных агрегатов хорошо ослабляются пассивной системой виброизоляции, то снижение нагрузки на корпус от воздействия низких частот является в настоящее время достаточно актуальной проблемой.

Если для целей виброзащиты нашли достаточно широкое применение активные виброзащитные системы (AB3C), в которых в качестве силового устройства (актуатора) применяются гидравлические, электродинамические, пьезоэлектрические и т. д. устройства (известны, например, активные виброзащитные платформы (фирма HALCYONICS, Германия, фирма Minus K, США) с диапазоном активного подавления 5...20 Гц), то для целей виброизоляции, т. е. для уменьшения передачи усилия на основание, что особенно актуально для судостроения, активные системы практически не применяются, хотя создание эффективной системы виброизоляции на частотах 2...10 Гц и ниже является актуальной и не решенной в настоящее время проблемой.

Принципиальные схемы и работа активных систем виброизоляции рассмотрены в работах [1—5].

В обзорной работе [1] дан подробный анализ и представлены предельные возможности активных систем с различными типами актуаторов (электродинамическими, магнитоэлектрическими, пьезоэлектрическими и т. д.), устанавливаемых между колеблющейся массой и корпусом, и работа которых определяется системой управления по сигналам акселерометра и датчика силы.

Активные системы виброизоляции повышают эффективность ослабления передачи усилия на корпус по сравнению с пассивными системами в довольно узкой области частот за резонансом колебательной системы, могут иметь частоту настройки в этой области с минимальным значением коэффициента виброизоляции [6] и могут понижать значение резонансной частоты [7].

Уменьшение коэффициента виброизоляции К_п

$$K_{\Pi} = \frac{|R(i\omega)|}{|F(i\omega)|}$$

где $|R(i\omega)|$ — модуль силы, передаваемой на корпус; $|F(i\omega)|$ — модуль активной силы, воздействующей на колебательную систему, в дорезонансной области с помощью актуатора, установленного между колеблющейся массой и корпусом, принципиально невозможно, так как на этих частотах уменьшение амплитуды колебаний массы компенсируется увеличением усилия актуатора на корпус.

Для решения актуальной проблемы снижения усилия на корпус в области низких дорезонансных частот можно использовать силовые устройства, устанавливаемые на основание или на колеблющуюся массу и создающие инерционные динамические усилия в противофазе с усилием на основание от колеблющейся массы [3].

Принцип динамической инерционной компенсации вибрационного усилия на корпус заключается в том, что на корпусе или на колеблющейся массе устанавливается актуатор (компенсатор) с массой на подвижном органе, и при возвратно-поступательном движении массы в противофазе с движением упругоподвешенной виброактивной массы будет создаваться на корпусе дополнительная инерционная сила, компенсирующая на заданной частоте виброактивную силу.

1. Активная система виброизоляции с установкой компенсатора на основании

На рис. 1 приведена принципиальная схема системы виброизоляции при установке электродинамического компенсатора на основании.



Рис. 1. Принципиальная схема виброизоляции с установкой компенсатора на корпусе:

1 — масса m_0 ; 2 — масса подвижной катушки компенсатора; 3 — магнитопровод компенсатора; 4 — силоизмерительное устройство; 5 — усилитель; 6 — основание

Движение электродинамического компенсатора описывается следующей системой дифференциальных уравнений [8]:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 = B l i; \\ L \frac{di}{dt} + R i = u - B l \dot{x}_1, \end{cases}$$
(1)

где u — напряжение управления на обмотке подвижной катушки; i — сила тока; Bli — электродинамическая сила; L, R — индуктивность и активное сопротивление подвижной катушки; B — магнитная индукция; l — общая длина проводника; b_1 —



Рис. 2. Структурная схема активной системы:

R — сила, действующая на основание от m_0 ; $R_{\text{ком}} = \ddot{x}_1 m_1$ — инерционная сила компенсатора; $a_3 = Lm$, $a_1 = c_1L + Rb_1 + B^2l^2$; $a_2 = bL + Rm_1$, $a_0 = c_1R$, $b_0 = Bl$; $K_{\text{дс}}$ — коэффициент передачи датчика силы; $\Delta R = R - R_{\text{ком}}$ — ошибка компенсации



Рис. 3. Упрощенная структурная схема активной системы $b' = b_1 + B^2 l^2$

коэффициент вязкого трения; c_1 — коэффициент жесткости; m_1 , x_1 — масса и перемещение подвижного узла.

Структурная схема активной системы виброизоляции в соответствии с рис. 1 и системой уравнений (1) представлена на рис. 2. Датчик силы измеряет разностный сигнал $\Delta R = R - R_{KOM}$.

Передаточная функция системы на рис. 2 по ошибке будет равна

$$W_{R, \Delta R}(p) = \frac{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}{a_3 p^3 + a_2' p^2 + a_1 p + a_0},$$
 (2)

где $a'_2 = a_2 + K_{\rm dc} K b_0 m_1$.

Оценка устойчивости по критерию Гурвица

$$(Bl + Rm_1 + K_{\rm AC}KBlm_1)(c_1L + Rb + B^2l^2) > Lm_1c_1R$$
(3)

показывает, что система устойчива при любых значениях параметров.

Из системы (1) в операторном виде можно получить

$$(T^2p^2 + 2\xi Tp + 1)(T_1p + 1)x_1 = \frac{Bl}{Rc_1}u, \qquad (4)$$

где
$$T^2 = \frac{m_1}{c_1}, 2\xi T = \frac{b_1 + B^2 l^2}{c_1}, T_1 = \frac{L}{R}$$

Если в качестве примера принять: $Bl = 100 \text{ Тл} \cdot \text{м};$ $L = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}; R = 50 \text{ Ом}; m = 1 \text{ кг}; c_1 = 3943 \text{ H/м};$ $b_1 = 10 \text{ H} \cdot \text{c/m}; T = 8 \cdot 10^{-3} \text{ c},$ то в этом случае постоянная привода составит $T_1 = 10^{-4} \text{ c}.$

Учитывая, что система виброизоляции должна работать в низкочастотном диапазоне 1...50 Гц, то электромагнитной постоянной времени T_1 можно пренебречь и исследовать упрощенную структурную схему на рис. 3.

Для указанных выше параметров и при $K_{\rm Ac} = 1$ В/Н для различных значений коэффициента усиления *К* в прикладной программе MATLAB/Simulink получены частотные характеристики $\Delta R(\omega)$ (рис. 4), где $\omega = 2\pi f$.

Из анализа структурной схемы (см. рис. 3) и графиков на рис. 4 следует, что увеличение коэффициента усиления K приводит к уменьшению ошибки компенсации, расширению зоны компенсации в низкочастотную область за счет изменения частоты собственных колебаний электродинамического компенсатора f_{01} =

 $= f_0 \frac{1}{\sqrt{K}}$ (f_0 — частота собственных

колебаний при K = 1) и увеличению колебательности системы.

Мехатроника, автоматизация, управление, Том 18, № 3, 2017



2. Активная система виброизоляции при установке компенсатора на массу *m*₀

При установке электродинамического компенсатора на массу m_0 и управлении компенсатора по сигналам от датчика перемещения x дифференциальные уравнения движения системы при представлении электродинамического привода в виде звена 2-го порядка (см. рис. 3) будут иметь следующий вид:

$$\begin{array}{l}
m_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 = \frac{Bl}{R} u; \\
u = Kx; \\
m_0 \ddot{x} + b_0 \dot{x} + c_0 x = F(t) - m_1 (\ddot{x}_1 - \ddot{x}). \end{array}$$
(5)

Вводя обозначения $F(t) - m_1 \ddot{x}_1 = \Delta F(t)$, систему (5) представим в виде

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 = \frac{Bl}{R} Kx; \\ (m_0 - m_1) \ddot{x} + b_0 \dot{x} + c_0 x = \Delta F. \end{cases}$$
(6)

Исследование эффективности работы системы компенсации возмущающего усилия F(t) показало,







пенсатора на m_0 : $1 - \Delta c = \Delta m = \Delta b = 0; 2 - \Delta c = 49\ 250\ \text{H/м}; 3 - \Delta m = 50\ \text{кг}; 4 - \Delta b = 500\ \text{H} \cdot \text{c/m}$

что необходимо учитывать разность фаз между силой $F(t) = F_0 \sin \omega t$ и перемещением $x(t) = x_0 \sin(\omega t + \varphi)$, где x_0 — амплитуда колебаний массы m_0 ; φ — сдвиг фаз путем, например, включения корректирующего звена.

Структурная схема замкнутой системы автоматического управления, соответствующая уравнениям (5) и (6) и с учетом передаточной функции корректирующего звена будет иметь вид, показанный на рис. 5.

Учитывая, что параметры колебательной системы, как правило, известны с достаточной точностью, передаточная функция корректирующего звена будет иметь вид ПИДД регулятора:

$$W_{\text{kop}}(p) = K_1 + \frac{K_2}{p} + K_3 p + K_4 p^2,$$
 (7)

где $K_1 = c_0 + \Delta c_0$, $K_2 = 0$, $K_3 = b_0 + \Delta b_0$, $K_4 = m_0 + \Delta m_0 -$ погрешности в оценке соответствующих величин.

ı

Частотные характеристики (рис. 6) построены для колебательной системы с параметрами $m_0 = 100$ кг, $\omega_0 = 31.4$ 1/с (5 Гц), $b_0 = 1500$ м/с · H, K = 100. Необходимо отметить, что работа системы ком-

Необходимо отметить, что работа системы компенсации возмущающего усилия не критична к по-

грешностям выбора параметров корректирующего звена.

Заключение

Таким образом, проведенное исследование показывает, что при электродинамическом компенсаторе с собственной частотой колебаний механической компоненты 10...15 Гц уменьшение усилия на корпус составит 20...50 дБ в диапазоне 1...100 Гц.

Список литературы

1. Кирюхин А. В., Тихонов В. А., Чистяков А. Г., Яблонский В. В. Активная виброзащита — назначение, принципы, состояние. 1. Назначение и принципы разработки // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2011. № 2. С. 108—111.

2. **Вибрации** в технике: Справочник: в 6 т. / Под ред. К. В. Фролова. М.: Машиностроение, 1981. Т. 6.

3. Активная виброизолирующая система трубопроводов аварийной системы расхолаживания ядерного реактора подводной лодки. Патент RU 2556867 C1 от 20.07.2015 / Кирюхин А. В., Федоров В. А., Мильман О. О. 4. Елисеев С. В., Резник Ю. Н., Хоменко А. П. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем. Новосибирск: Наука, 2011. 384 с.

5. Рыбак Л. А., Синёв А. В., Пашков А. И. Синтез активных систем виброизоляции на космических объектах. М.: Янус-К, 1997. 160 с.

6. Бурьян Ю. А., Сорокин В. Н., Галуза Ю. Ф., Поляков С. Н. Активная виброизоляционная опора с экстремальной системой управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 9 (162). С. 41—45.

7. Петров А. А. Устойчивость одномассовой системы активной виброизоляции с обратной связью по силовому воздействию // Доклады XXVII сессии РАО. 2014.

8. **Вибрации** в технике: Справочник: в 6 т. / Под ред. К. В. Фролова. М.: Машиностроение, 1981. Т. 4. 509 с.

Dynamic Compensation for the Vibro-Active Forces in the Vibrating Systems

U. A. Buryan, burian@omgtu.ru⊠, V. V. Shalay, info@omgtu.ru,
 Omsk State Technical University, Omsk, 644050, Omsk Branch, Russian Federation,
 A. V. Zubarev, infoGprogress-omsk.ru, S. N. Polyakov, lab120@progress-omsk.ru,
 Progress Scientific-Production Enterprise, Omsk, Russian Federation

Corresponding author: Buryan Uryi A., Ph.D., Doctor of Technical Sciences, Professor, Omsk State Technical University, Omsk, 644050, Omsk Branch, Russian Federation, e-mail: burian@omgtu.ru

> Received on May 30, 2016 Accepted on June 14, 2016

The paper presents an active system for isolation of vibration, which compensates for the dynamic forces on the ground arising from the fluctuations of the elastically suspended mass with a vibro-active element by using the inertial forces in the antiphase. As the dynamic forces' compensator an electrodynamic drive is used, in which the linear movement of the rotor with an additional weight is carried out according to the information coming from a force sensor or accelerometer.

The principle of the dynamic inertial compensation for the vibratory force boils down to the following: an oscillating mass actuator (compensator) with a mass on a movable body is mounted on the main body and with the reciprocating movement of the mass in an antiphase together with the motion of the elastically suspended vibro-active mass an additional inertial power is created, compensating for the vibro-active force at a given frequency.

A possibility of mounting of an electrodynamic compensator is considered in this paper. The compensator is mounted on the oscillating weight, or on the body near the elements of the passive vibration isolation system. The active vibration isolation system with an electrodynamic compensator considered in this work can ensure an effective reduction of the power transmission to the base of the oscillation of the elastically suspended mass by 20-50 dB in the low frequency range.

Keywords: isolation of vibration, active system, vibro-active forces, electrodynamic compensator, force sensor, motion sensor, transfer function

For citation:

Buryan U. A., Shalay V. V., Zubarev A. V., Polyakov S. N. Dynamic Compensation for the Vibro-Active Forces in the Vibrating Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2017, vol. 18, no. 3, pp. 192–195.

DOI: 10.17587/mau.18.192-195

References

1. Kiryuhin A. V., Tikhonov V. A., Chistyakov A. G., Yablonsky V. V. Problems of mechanical engineering and automation, 2011, no. 2, pp. 108–111 (in Russian).

2. **Frolov K. V.** ed. *Vibratsii v tekhnike: Spravochnik: v 6 t.* (Vibration Technique: Handbook), Moscow, Engineering, 1981, vol. 6 (in Russian).

3. **The active** vibration isolating piping emergency system shutdown cooling of a nuclear reactor of the submarine. Patent RU 2556867 C1

on 07/20/2015, Kiryuhin A. V., Fedorov V. A., Milman O. O. (in Russian).

4. Eliseev S. V., Resnick Yu. N., Khomenko A. P. Mekhatronnye podkhody v dinamike mekhanicheskikh kolebatel'nykh system (Mechatronic approaches in the dynamics of mechanical oscillation systems), Novosibirsk, Nauka, 2011, 384 p. (in Russian).

5. **Rybak L. A., Sinev A. V., Pashkov A. I.** *Sintez aktivnykh sistem vibroizolyatsii na kosmicheskikh ob"ektakh* (The synthesis of the active vibration isolation systems in space objects), Moscow, Janus-K, 1997, 160 p. (in Russian).

6. Burian Yu. A., Sorokin V. N., Galuza Yu. F., Polyakov S. N. *Mekhatronika, avtomatizatsia, upravlenie,* 2014, no. 9 (162), pp. 41–45 (in Russian).

7. Petrov A. A. Reports of the XXVII session RAO, 2014 (in Russian).

8. **Frolov K. V.** ed. *Vibratsii v tekhnike: Spravochnik: v 6 t.* (Vibration Technique: Handbook), Moscow, Engineering, 1981, vol., 509 p. (in Russian).

УДК 531.383, 519.688, 51-74

DOI: 10.17587/mau.18.196-205

В. М. Панкратов, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией, vmpank@mail.ru,
 М. А. Барулина, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, marina@barulina.ru,
 Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов

Сравнительный анализ различных подходов к расчету собственных частот чувствительных элементов МЭМС-гироскопов*

Проведено сравнение различных моделей, использующихся для определения собственных частот чувствительного элемента микромеханических гироскопов на этапе их проектирования. Обсуждается применение математических моделей, рассматривающих чувствительный элемент как дискретную систему, и конечно-элементное моделирование с помощью элементов, учитывающих классическую теорию изгиба Эйлера—Бернулли и теорию Тимошенко. Даны конкретные рекомендации по проведению исследования микромеханических датчиков и определения их собственных частот.

Ключевые слова: микромеханический гироскоп, конечно-элементное моделирование, собственные частоты, теория Тимошенко

Введение

Микромеханические гироскопы в настоящее время являются одним из перспективных видов датчиков инерциальной информации, которые широко применяются в различных областях техники [1—9].

При проектировании микромеханических гироскопов (ММГ) одной из важных задач является задача определения собственных частот их чувствительного элемента (ЧЭ). Так, например, чувствительность ММГ зависит от того, насколько близко частота вынужденных колебаний ЧЭ к его собственной частоте [10, 11]. Также определение собственных частот имеет большое значение при разработке виброзащиты датчика.

В настоящее время можно выделить в основном два подхода к решению задачи нахождения собственных частот ЧЭ ММГ.

При первом подходе датчик рассматривается как дискретная система, в которой центры масс его компонентов (ЧЭ и рамок) связаны торсионами или упругими подвесами заданной жесткости [9—11]. Достоинством этого подхода является возможность построения математической модели, описывающей динамику центров масс компонентов датчика, решение которой в ряде случаев может быть получено аналитически. Среди недостатков такого подхода можно назвать невозможность проведения более общего анализа, например определения трехмерных форм собственных колебаний ЧЭ.

Во втором подходе датчик рассматривается как распределенная система. В этом случае все конструкционные элементы ЧЭ — инерционная масса, рамки, торсионы и упругие подвесы — рассматриваются как деформируемые твердые тела, связанные между собой. Построение математической модели такой распределенной системы представляет собой довольно трудоемкую задачу, поэтому прибегают к конечно-элементному моделированию с помощью одного из программных комплексов (ANSYS [12], Code-Aster [13], CalculiX [14], OpenFOAM [15], COMSOL Multiphysics [16], Matlab FEM Toolbox [17] и др.) или специально разработанного уникального программного обеспечения [18]. Результаты конечно-элементного моделирования зависят от того, на какие элементы разбивается модель. Поэтому даже при предварительном моделировании создаваемого ММГ необходимо уделить внимание выбору используемых элементов. Для создания конечно-элементной модели могут быть использованы различные типы конечных элементов, реализующие ту или иную теорию изгиба, например, классическую теорию изгиба Эйлера-Бернулли [19] или неклассическую теорию Тимошенко [20], учитывающую сдвиг и инерцию поперечного сечения элемента при изгибе.

При этом представляет интерес вопрос о том, насколько различаются значения собственных частот, определяемых при использовании вышеупомянутых подходов, и насколько существенное влияние на получаемые результаты оказывает выбор теории изгиба, в рамках которой осуществляется конечно-элементное моделирование.

Целью работы является изучение влияния применения различных моделей расчета при определении значений собственных частот ЧЭ ММГ на получаемые результаты.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

 ^{*} Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ
 № 16-08-00328 А0.

- рассмотрены конструктивные схемы ЧЭ ММГ, для которых известны математические модели динамики центров масс их компонентов, на примере суперминиатюрного ММГ и акселерометра (СММГА) [21] и ММГ с кардановым подвесом ЧЭ (карданового ММГ) [10, 11];
- проведено сравнение значений собственных частот консольного трехмерного элемента прямоугольного сечения, определяемых в результате



Рис. 1. Конструкция ЧЭ СММГА:

массой

1 — инерционная масса; 2 — корпус; 3, 4 — МЭМС-структуры для возбуждения первичных колебаний и съема выходной информации; 5, 6 — упругие элементы



Рис. 2. Конструкция ЧЭ ММГ с кардановым подвесом: *1* — наружная рамка; *2*, *5* — торсионы наружной рамки; *3*, *6* — внутренние торсионы; *4* — внутренняя рамка с инерционной



Рис. 3. Конечно-элементная модель балки в системе ANSYS

численного моделирования с использованием объемных конечных элементов, реализующих теорию Тимошенко и теорию Эйлера—Бернулли;

- построены конечно-элементные модели СММГА и карданового ММГ и определены их собственные частоты и формы собственных колебаний в известном программном комплексе ANSYS и в специализированном оригинальном программном обеспечении [18] с помощью трехмерного конечного элемента (ТКЭ) *ТВЕlement*, учитывающего неклассическую теорию Тимошенко [22, 23];
- проведен анализ полученных результатов, выработаны конкретные рекомендации по использованию различных теорий изгиба при проведении конечно-элементного моделирования ЧЭ ММГ и определению их собственных частот и форм колебаний.

Конструктивные схемы ЧЭ СММГА и ЧЭ карданового ММГ

Рассматриваемые в работе конструктивные схемы ЧЭ СММГА и ЧЭ карданового ММГ показаны на рис. 1 и рис. 2 соответственно.

При исследовании принимались следующие исходные параметры:

- для ЧЭ СММГА [21]: материал для всех конечных элементов кремний (коэффициент Юнга $E = 190 \ \Gamma\Pi a$; плотность $\rho = 2228 \ \kappa\Gamma/m^3$); геометрические параметры 1-го и 3-го элементов (упругих подвесов): длина $l_i = 164,9$ мкм, высота $h_i = 3,6$ мкм, толщина $b_i = 3,6$ мкм (i = 1,3); геометрические параметры 2-го элемента (ЧЭ): $l_2 = h_2 = b_2 = 164,9$ мкм.
- для карданового ЧЭ ММГ [10] (кварц): модуль Юнга $E = 1,68 \cdot 10^{11}$ Па, модуль сдвига G = $= 6,17 \cdot 10^{10}$ Па, плотность $\rho = 2,33 \cdot 10^3$ кг/м³; $L_2 = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м, $a_2 = 0,8 \cdot 10^{-2}$ м, $l_2 = 0,0375 \cdot 10^{-2}$ м, $L_1 = l_1 = 0,6 \cdot 10^{-2}$ м. Для внутренних торсионов: $l_T = 0,1 \cdot 10^{-2}$ м, $b_T = c_T = 0,028 \cdot 10^{-2}$ м. Для торсионов наружной рамки: $l_T = 0,162 \cdot 10^{-2}$ м, $b_T =$ $= c_T = 0,035 \cdot 10^{-2}$ м.

Сравнение конечных трехмерных элементов, реализующих теорию Эйлера—Бернулли и теорию Тимошенко

Прежде чем приступить к моделированию реальных конструктивных схем ЧЭ ММГ, необходимо выяснить на более простых моделях, насколько влияет выбор той или иной теории изгиба, реализующейся используемыми конечными элементами, на получаемые значения собственных частот.

Рассмотрим в качестве модельного примера ТКЭ консольную балку прямоугольного сечения (рис. 3), для которой известны частотные уравнения в соответствии как с теорией Эйлера—Бернулли (Э. Б.) [24],

Таблица 1

Первая соб	бственная	частота	консольной	балки
------------	-----------	---------	------------	-------

LARA		Часто	та, Гц	Погрешность, %			
L, MKM	Аналит.	Т. Т.	Э. Б.	ANSYS	Т. Т.	Э. Б.	ANSYS
200 100 50	$9,237 \cdot 10^5$ $3,593 \cdot 10^6$ $1,306 \cdot 10^7$	$9,245 \cdot 10^5$ $3,599 \cdot 10^6$ $1,307 \cdot 10^7$	$9,305 \cdot 10^5$ $3,689 \cdot 10^6$ $1,429 \cdot 10^7$	$9,2627 \cdot 10^5$ $3,5956 \cdot 10^6$ $1,2928 \cdot 10^7$	0,09 0,17 0,08	0,74 2,67 9,42	0,28 0,08 1,01



Рис. 4. Возрастание погрешности определения собственных частот балки с уменьшением ее длины при использовании: 1 — теории Тимошенко; 2 — теории Эйлера—Бернулли; 3 — ANSYS

так и с теорией Тимошенко (Т. Т.) [20]. При моделировании высота и ширина балки принималась равной h = 25 мкм, длина варьировалась. Материал элемента — кварц.

Для рассматриваемых элементов различной длины было проведено конечно-элементное моделирование с помощью ТКЭ и в программном комплексе ANSYS (рис. 3), а также были найдены (табл. 1) аналитические значения собственных частот из уравнений, полученных в работе [20]:

$$EJ\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho A\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \left(\rho J + \frac{\rho EJ}{kG}\right)\frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\rho^2 J}{kG}\frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = 0,$$

где E — модуль упругости; J — момент инерции поперечного сечения относительно оси, проходящей через центр его тяжести перпендикулярно плоскости колебаний; ρ — плотность; A — площадь поперечного сечения; k — коэффициент сдвига, вводимый в теории Тимошенко и учитывающий нели-



нейность распределения нормальных продольных и поперечных напряжений; *у* — поперечное смещение центра масс поперечного сечения; *t* — время.

В табл. 1 в столбцах "Т. Т." и "Э. Б." показаны значения собственной частоты рассматриваемой балки, полученные в результате моделирования с помощью ТКЭ с учетом и без учета теории Тимошенко соответственно.

В столбце "ANSYS" показано значение собственной частоты, полученной в ANSYS. В столбцах "Погрешность" показано отличие в процентах соответствующих значений от значений собственной частоты, полученной на основе частотных уравнений [20] для балки Тимошенко и приведенных в столбце "Аналит.".

Как видно из табл. 1, значения собственной частоты, получаемые при численном моделировании в рамках теории Эйлера—Бернулли, мало отличаются от аналитических значений только для длинных балок ($L/h \ge 4$). С уменьшением длины балки практически экспоненциально увеличивается отличие значений собственных частот, получаемых на основе теории Эйлера—Бернулли и в рамках теории Тимошенко (рис. 4). Это можно объяснить тем, что с уменьшением длины балки возрастает влияние краевых эффектов при изгибе. И если для длинной балки сдвигом и инерцией ее поперечного сечения при изгибе можно пренебречь, то с уменьшением длины балки их влияние будет возрастать.

Таким образом, использовать теорию Эйлера— Бернулли для моделирования и определения собственных частот ЧЭ ММГ представляется целесообразным только в случае, если ЧЭ ММГ можно представить в виде достаточной длинной ($L/h \ge 4$) балки или системы таких балок (элементов).

Конечно-элементные модели ЧЭ СММГА и ЧЭ карданового ММГ

На следующем этапе были построены конечно-элементные модели ЧЭ СММГА и ЧЭ карданового ММГ. На рис. 5, 6 показаны, соответственно, конечно-элементные модели, построенные для ЧЭ СММГА и ЧЭ карданового ММГ, в ANSYS и в разработанном специализированном программном обеспечении СММГА-01 и CardanMMG-01 [18] с использованием трехмерного конечного элемента *TBElement* (ТКЭ), описанного в работе [22]. ТКЭ был выбран, поскольку в отличие от элементов ANSYS его математическое описание открыто, и известно, что он полностью учитывает теорию Тимошенко. Отметим, что ТКЭ позволяет проводить моделирование динамики не только ЧЭ, но и всего датчика, как полностью учитывая теорию Тимошенко, так и в рамках теории Эйлера—Бернулли.

Конечно-элементная модель ЧЭ СММГА, построенная в СММГА-01 (см. рис. 5, *б*), состоит из трех элементов и четырех узлов. Инерционной массе соответствует второй эле-

мент, упругим подвесам — первый и третий элемент. Первому элементу принадлежат узлы 1, 2. Второму — узлы 2, 3. Третьему элементу — узлы 3 и 4. В узлах 1 и 4 — жесткое закрепление.

Конечно-элементная модель ЧЭ карданового ММГ, созданная в CardanMMG-01 (рис. 6, δ), состоит из 15 элементов, номера узлов обозначены черными цифрами в белых кружках. Предполагается, что в узлах 1 и 10 датчик жестко закреплен.

Численное моделирование и анализ результатов

На первом этапе был проведен частотный анализ СММГА, результаты которого показаны в табл. 2 и на рис. 7. В табл. 2 приведены значения собственных частот, полученных в программном обеспечении СММГА-01 и в комплексе ANSYS. В столбце "δ" приведена разность значений, полученных в программном комплексе ANSYS и в оригинальном разработанном программном обеспечении СММГА-01, в процентах от значений ANSYS.

Аналитическое значение частоты, приведенное в работе [21] и вычисленное в предположении, что СММГА представляет собой дискретную систему, в которой центр масс его инерционной массы подвешен с помощью упругих подвесов заданной жесткости, равно 1000 Гц.

Отметим, что получаемые в результате численного исследования СММГА значения собственных частот довольно затруднительно сравнить с аналогичным аналитическим значением частоты, приведенным в работе [21], так как эта частота получена в предположении, что собственные колебания инерционной массы будут поступательными и будут совершаться в одной из координатных плоскостей. Такой формы собственных колебаний не предсказывает численное моделирование ни с помощью ANSYS, ни с помощью СММГА-01.

Первая мода (табл. 2) представляет собой крутильные колебания инерционной массы вокруг оси x (рис. 7, a). Вторая и третья моды — поступательные колебания инерционной массы (рис. 7, δ , a). На рис. 7 контуром показано недеформированное положение СММГА, стрелками отображаются направления собственных колебаний.

Как видно из табл. 2, значения собственных частот, полученных в СММГА-01, отличаются от значений, полученных в программном комплексе ANSYS, не более чем на 5,3 %. Отметим, что по второй и третьей модам отличие значений, полученных в СММГА-01 и ANSYS, составляет менее 1 %, тогда как для первой моды, которой соответствуют крутильные колебания, имеет место максимальное отличие в 5,25 %. Это можно объяснить тем, что возможно в выбранных для построения модели в ANSYS элементах не полностью реализуется теория изгиба Тимошенко, и при решении некоторых типов задач пренебрегается сдвиговой деформацией поперечного сечения элемента.

В табл. 3 приведены значения собственных частот, полученных из математической модели, приведенной в работе [10], в программном обеспече-



N⁰	Частот	\$ %					
моды	СММГА-01	ANSYS	0, 70				
1 2 3	3971,4 6006,1 6006,1	3773,2 6017,0 6019,2	5,25 0,18 0,22				



Рис. 7. Первая (а), вторая (б) и третья (в) формы собственных колебаний СММГА





Таблица 3 Собственные частоты ММГ с кардановым подвесом

N⁰		s %		
моды	Аналит. [1]	CardanMMG-01	ANSYS	0, 70
1	500	956,98	942,12	1,58
2	—	1018,11	962,91	5,75

нии CardanMMG-01 с учетом теории Тимошенко, и в комплексе ANSYS. Значения в столбце " δ " вычислялись как разность значений, полученных в CardanMMG-01 и в ANSYS, в процентах от значений ANSYS.

Как видно из табл. 3, различие значений собственных частот, получаемых в ANSYS и CardanMMG-01, не превышает 6 %, тогда как аналитическое значение собственной частоты, приведенное в работе [10], равно 500 Гц, что почти в два раза меньше, чем значения, полученные как в CardanMMG-01, так и в ANSYS.

Также в CardanMMG-01 и ANSYS были построены первая и вторая формы собственных колебаний ЧЭ карданового ММГ, которые практически совпадают друг с другом.

В целом, так как первая и вторая частоты собственных колебаний ЧЭ гироскопа близки, можно сказать, что результаты частотного анализа ЧЭ карданового ММГ, проведенного в разработанной специализированной программе CardanMMG-01, с достаточной точностью соответствуют результатам, полученным в ANSYS.

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что собственные частоты ЧЭ ММГ, получаемые на основе математических моделей, рассматривающих датчик как дискретную систему, могут быть использованы только для качественного анализа динамики ЧЭ ММГ, так как значения собственных частот, получаемые на таких моделях, существенно (в разы) отличаются от значений, получаемых при конечно-элементном моделировании ЧЭ ММГ с помощью объемных элементов.

Рассматривать при численном моделировании ЧЭ ММГ как распределенную механическую систему конечных элементов, реализующих теорию Эйлера — Бернулли, представляется целесообразным только в том случае, если для построения модели ЧЭ ММГ будут использованы достаточно длинные конечные элементы, отношение длины которых к характеристическому размеру (высоте или ширине) больше или равно 4. Использование теории Эйлера — Бернулли приводит к более простым, по сравнению с теорией Тимошенко, уравнениям, описывающим изгиб конечного элемента, что делает в этом случае более очевидным влияние параметров модели на конечный результат. Однако основным методом нахождения собственных частот ЧЭ ММГ на этапе проектирования датчика следует признать метод конечно-элементного моделирования с использованием элементов, учитывающих теорию Тимошенко, с помощью специализированного программного обеспечения или универсальных программных комплексов для численного моделирования, поддерживающих такие элементы.

Список литературы

1. **Пешехонов В. Г.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. № 1. С. 3–17.

2. Боронахин А. М., Подгорная Л. Н., Бохман Е. Д., Филипеня Н. С., Филатов Ю. В., Шалымов Р. В., Ларионов Д. Ю. Использование микромеханических чувствительных элементов в задачах диагностики рельсового пути // Гироскопия и навигация. 2012. № 1 (76). С. 57-66.

3. Лестев А. М., Попова И. В. Современное состояние и тенденции развития механических миниатюрных гироскопов в России // Гироскопия и навигация. 1997. № 2. С. 17—23.

4. Gabriel M. Rebeiz RF MEMS: Theory, Design, and Technology, 2001. 512 p.

5. **Ghodssi R., Lin P.** MEMS Materials and Processes Handbook (MEMS Reference Shelf) 2011th Edition. 1188 p.

6. **Dussy S., Durrant D., Moy T., Perriault N., Célerier B.** MEMS gyro for space applications. Overview of European activities // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit 15–18 August 2005, San Francisco, California.

7. Acar C., Shkel A. MEMS Vibratory Gyroscopes: Structural Approaches to Improve Robustness. Springer Publishing Company, Inc. 2008. 272 p.

8. **Choudhary V., Iniewski K.** MEMS: Fundamental Technology and Applications (Devices, Circuits, and Systems). CRC Press, 2013. 478 p.

9. Лукьянов Д. П., Распопов В. Я., Филатов Ю. В. Микромеханические навигационные приборы. С.-Петербург: Изд. Санкт-Петербургского гос. электротехнического ун-та "ЛЭТИ", 2008. 203 с.

10. Располов В. Я. Микромеханические приборы: учеб. пособие. Тула: Изд. Тул. гос. университета, 2002. 392 с.

11. Джашитов В. Э., Панкратов В. М. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий / Под общ. ред. акад. РАН В. Г. Пешехонова. С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2005. 404 с.

12. **Tickoo** Sham ANSYS 11.0 for Designers — CADCIM Technologies. 544 p.

13. **Code** Aster. [R3.08.01] "Accurate" beam elements (straight and curved). Документация для версии Code Aster 11. URL: http:// code-aster.org/doc/v11/en/index.php?man = R3 (Дата обращения: 20.03.2016).

14. **CalculiX** CrunchiX USER'S MANUAL version 2.5. Convergent Mechanical. 2003—2015. URL: http://bconverged.com/calculix/ doc/ccx/html/ccx.html Дата обращения: 20.03.2016).

15. **OpenFOAM**. Free Open Source CFD. The OpenFOAM Foundation. Корпоративный сайт. OpenFOAM Foundation. 2011—2016. URL: http://www.openfoam.org/ (Дата обращения: 20.03.2016).

URL: http://www.openfoam.org/ (Дата обращения: 20.03.2016). 16. **COMSOL** Multiphysics. The Platform for Physics-Based Modeling and Simulation. Корпоративный сайт. COMSOL Inc. 2016 URL: https://www.comsol.com/comsol-multiphysics (Дата обращения: 11.07.2016).

17. Octave and Matlab FEM Toolbox. Корпоративный сайт. Precise Simulation Ltd. 2016. URL: http://www.featool.com (Дата обращения: 11.07.2016).

18. Барулина М. А., Панкратов В. М. Моделирование динамических процессов в микромеханических датчиках инерциальной информации и их компонентах с помощью специализированного программного обеспечения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королева. 2015. Т. 14. № 2. С. 223–233.

19. Елисеев В. В. Механика упругих тел. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. 341 с.

20. Григолюк Э. И., Селезов И. Т. Неклассические теории колебаний стержней, пластин и оболочек // Итоги науки и техники. Сер.: Мех. тверд. деформ. тел. М.: ВИНИТИ, 1973. Т. 5. 272 c.

21. Джашитов В. Э., Панкратов В. М., Барулина М. А. Теоретические основы разработки и создания суперминиатюрного микромеханического многофункционального датчика инерциальной информации // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 5 (118). C. 46-54.

22. Барулина М. А. Математическое обеспечение конечно-элементного моделирования микромеханических датчиков инерциальной информации в рамках неклассической теории изгиба // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 11. С. 764—770.

23. Барулина М. А. Построение матрицы масс трехмерного конечного элемента для моделирования динамики микромеханических датчиков инерциальной информации и их узлов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 5. С. 352-360.

24. Филиппов А. П. Колебания упругих систем. Киев: Изд-во АН УССР, 1956. 322 с.

A Comparative Analysis of Different Approaches to Determination of the Natural Frequencies of the MEMS Gyros

V. M. Pankratov, vmpank@mail.ru, M. A. Barulina, marina@barulina.ru, Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Saratov, 410028, Russian Federation

> Corresponding author: Barulina Marina A., Ph.D., Senior Researcher, Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Saratov, 410028, Russian Federation, e-mail: marina@barulina.ru

> > Received on September 05, 2016 Accepted on September 23, 2016

The article is devoted to research different approaches used to determine the natural frequencies of the MEMS-gyro sensing element at the design stage. In a general case, the MEMS-gyro sensing element can be presented as one or more proof masses, which are connected with each other and with the gyro base by means of springs. Well-known mathematical models for the dynamics of the sensitive element consider it as a discrete system, where the proof masses are substituted by its mass center and the springs are substituted by their stiffness. The finite element modeling (FEM) allows us to consider the sensitive element as a system of linked solid deformable bodies. However, the results of the finite element simulation of the sensing element dynamics depends on the theory of bending supported in the elements used for modeling. Currently, the classical theory of bending of the Euler-Bernoulli and Timoshenko theory are widely used for the finite element simulation of the sensing element. Each of the three approaches (the mathematical models, FEM with Euler-Bernoulli theory, FEM with Timoshenko theory) has its advantages and disadvantages. In the paper the problem of the difference of the simulation results using one of the three approaches by the example for determination of the micromechanical gyroscope natural frequencies was investigated. Specific recommendations for the study of the micromechanical sensors and determination of their natural frequencies were formulated.

Keywords: micromechanical gyroscope, finite element modeling, natural frequencies, Timoshenko theory, Euler-Bernoulli theory, mathematical models

Acknowledgements: This work was supported by RFBR grant № 16-08-00328 A0.

For citation:

Pankratov V. M., Barulina M. A. A Comparative Analysis of Different Approaches to Determination of the Natural Frequencies of the MEMS Gyros, Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 196-202.

DOI: 10.17587/mau.18.196-202

References

1. Peshekhonov V. G. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiva giroskopicheskikh sistem (Gyroscopic Systems: Current Status and Prospects), Giroskopiya i Navigatsiya, 2011, no. 1, pp. 3-17 (in Russian).

2. Boronakhin A. M., Podgornaya L. N., Bokhman E. D., Filipenya N. S., Filatov Yu. V., Shalymov R. B., Larionov D. Yu. Ispol'zovanie mikromehanicheskih chuvstvitel'nyh elementov v zadachah diagnostiki rel'sovogo puti (MEMS-based inertial system for railway track diagnostics), Giroskopiya i Navigatsiya, 2012, no. 1 (76), pp. 57-66 (in Russian).

3. Lestev A. M., Popova I. V. Sovremennoe sostojanie i tendencii razvitija mehanicheskih miniatjurnyh giroskopov v Rossii (Micromechanical gyros recent state and development trend in Russia), Girosko*piya i Navigatsiya*, 1997, no. 2, pp. 17–23 (in Russian).
4. Gabriel M. Rebeiz RF MEMS: Theory, Design, and Tech-

nology, 2001, 512 pp.

5. Ghodssi R., Lin P. MEMS Materials and Processes Handbook (MEMS Reference Shelf), 2011th Edition.

6. Dussy S., Durrant D., Moy T., Perriault N., Célerier B. MEMS gyro for space applications. Overview of European activities, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit 15-18 August 2005, San Francisco, California.

7. Acar C., Shkel A. MEMS Vibratory Gyroscopes: Structural Approaches to Improve Robustness, Springer Publishing Company, Inc. 2008.

8. Choudhary V., Iniewski K. MEMS: Fundamental Technology and Applications (Devices, Circuits, and Systems), CRC Press, 2013.

9. Loukianov D. P., Raspopov V. Ya., Filatov Y. V. Mikromekhanicheskie navigatsionnye pribory (Micromechanical navigation devices), FASO Russia, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 2008, 203 p. (in Russian).

10. Raspopov V. Ya. Mikromekhanicheskie pribory. Uchebnoe posobie (Micromechanical sensors. Tutorial), Tula, 2002 (in Russian).

11. Dzhashitov V. E., Pankratov V. M. Datchiki, pribory i sistemy aviakosmicheskogo i morskogo priborostroeniya v usloviyakh teplovykh vozdeystviy (Sensors, devices and systems for aerospace and marine engineering in the conditions of thermal influence), S.-Peterburg, CSRI "Elektropribor", 2005 (in Russian).

12. Tickoo Sham ANSYS 11.0 for Designers - CADCIM Technologies.

13. Code Aster. [R3.08.01] "Accurate" beam elements (straight and curved), available at: http://code-aster.org/doc/v11/en/index. php?man-R3.

14. **CalculiX** CrunchiX USER'S MANUAL version 2.5 // Convergent Mechanical. 2003-2015, available at: http://bconverged.com/calculix/doc/ccx/html/ccx.html

15. **OpenFOAM**. Free Open Source CFD. The OpenFOAM Foundation// OpenFOAM Foundation, available at: http://www.openfoam.org/

16. **COMSOL** Multiphysics. The Platform for Physics-Based Modeling and Simulation: available at: https://www.comsol.com/comsol-multiphysics.

17. Octave and Matlab FEM Toolbox, available at: http:// www.featool.com

 Barulina M. A., Pankratov V. M. Modelirovanie dinamicheskikh protsessov v mikromekhanicheskikh datchikakh inertsial'noi informatsii i ikh komponentakh s pomoshch'yu spetsializirovannogo programmnogo obespecheniya (Modeling of dynamic processes in micromechanical inertial sensors and their components using specialized software), Vestnik SSAU, 2015, vol. 14, no. 2, pp. 223–233 (in Russian).
 19. Eliseev V. V. Mekhanika uprugikh tel (The mechanics of elastic

19. Eliseev V. V. Mekhanika uprugikh tel (The mechanics of elastic bodies), St. Petersburg, Publishing house of SPbGTU, 1999, 341 p. (in Russian).

20. Grigolyuk E. I., Selezov I. T. Neklassicheskie teorii kolebaniy sterzhney, plastin i obolochek (Non-classical theory of vibrations of rods, plates and shells), Itogi nauki i tekhniki. Ser.: Mekh. tverd, deform. tel, Moscow, VINITI, 1973, vol. 5, 272 p. (in Russian). 21. Dzhashitov V. E., Pankratov V. M., Barulina M. A. Teoreticheskie osnovy razrabotki i sozdaniya superminiatyurnogo mikromekhanicheskogo mnogofunktsional'nogo datchika inertsial'noy informatsii (The Theoretical Bases of Development and Creation of the Superminiature Micromechanica/ Multifunction Sensor of the Inertia/ Information), Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika, 2010, no. 5 (118), pp. 46–54 (in Russian).

22. Barulina M. A. Matematicheskoe obespechenie konechno-elementnogo modelirovaniya mikromekhanicheskikh datchikov inertsial'noi informatsii v ramkakh neklassicheskoi teorii izgiba (Finite-Element Modeling of the Micromechanical Inertial Sensors Using Non-Classical Beam Theory), Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2015, vol. 16, no. 11, pp. 764–770 (in Russian).

23. **Barulina M. A.** Postroenie matritsy mass trekhmernogo konechnogo ele-menta dlya modelirovaniya dinamiki mikromekhanicheskikh datchikov inertsial'noy informatsii i ikh uzlov (Development of a Mass Matrix of the 3D Finite Element for Modeling of the Dynamics of Micromechanical Inertial Sensor Data and their Components), Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 352–360 (in Russian).

24. **Filippov A. P.** *Kolebaniya uprugikh sistem* (Vibrations of elastic systems), Publisher Ukrainian Academy of Sciences, Kyiv, 1956 (in Russian).

УДК 004.942 + 004.5

DOI: 10.17587/mau.18.202-207

Б. Д. Аминев, мл. науч. сотр., daianovich@mail.ru, **С. К. Данилова,** канд. техн. наук, вед. науч. сотр., lab45_1@ipu.ru, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН

Автоматизация управления движением морского подводного объекта по заданному маршруту на основе имитационного моделирования*

Описывается автоматизация управления движением морского подводного объекта по заданному маршруту в пространстве средствами разрабатываемого программного обеспечения с применением методов полномасштабного имитационного моделирования и теории управления сложными динамическими объектами. Рассмотрены проблемы, возникшие во время разработки, и пути их решения, приведен анализ перспектив дальнейшего развития разработанной системы. Приведены результаты работы приложения в рамках реального проекта при решении задачи реализации маршрута за допустимый интервал времени движения. **Ключевые слова:** автоматизация, управление, полномасштабное имитационное моделирование, морской подводный объект,

Ключевые слова: автоматизация, управление, полномасштаоное имитационное мооелирование, морск траекторное движение, малошумное маневрирование

Введение

Модель динамики морского подводного объекта (МПО) представляет собой сложную систему нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка. Управление МПО является по своей структуре сетевым (осуществляется с различных постов управления), многомерным, многоканальным, проводится с ограничениями на фазовые координаты движения с использованием различных средств управления, которые имеют как гидродинамическую, так и гидростатическую природу. К первой группе относятся гидродинамические рули, позволяющие МПО маневрировать в пространстве на ходу. Эффективность управления горизонтальными и вертикальными рулями зависит от скорости движения МПО, углов перекладки и их допустимых значений. Гидростатические средства управления (цистерны) применяются на малых скоростях и в режиме "без хода" [1]. В исследуемом режиме управления цистерны используются для создания балласта, компенсирующего силы обжатия корпуса МПО и учета гидрологических разрезов. Разработка работоспособных алгоритмов управления движением МПО в различных режимах управления должна проводиться в ходе исследования его маневров с ограничениями на интенсивность управления, состав средств управления, скорость движения с применением полномасштабной имитационной модели объекта [2]. Управление должно основываться на физической и технической интерпретации работы технических средств управления, модели движения объекта и обеспечивать функциональность для выполнения режимов движения.

 ^{*} Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 15-08-05133а.

Особенности задачи управления движением МПО

Реализуемый маршрут задается набором пространственных координат на карте, соединенных прямыми. Во время реализации маршрута необходимо обеспечить такой режим движения, чтобы МПО создавал как можно меньше шумов (например, акустических и гидрофизических). Для решения этой задачи применяется малошумный режим маневрирования, предполагающий понижение кавитационных и других шумов за счет введения ограничений на фазовые координаты и скорость движения объекта [3]. Визуальный образ задачи малошумного маневрирования приведен на рис. 1 (см. третью сторону обложки).

Справа видна зеленая область допустимого маневрирования, слева — визуализация МПО. Снизу расположены органы управления, позволяющие задавать параметры маневра, настройки алгоритмов управления, а также ограничения на средства управления МПО.

Для реализации малошумного маневрирования по точкам маршрута на карте необходимо выполнить следующий набор действий:

1) извлечь из внешней базы данных координаты точек, составляющих маршрут (точки заданы в Земной системе координат);

2) преобразовать полученные координаты в связанную систему координат;

3) на основании координат точек маршрута, заданных в связанной системе координат, сгенерировать задания для системы полномасштабного имитационного моделирования и сохранить их во внутренней базе данных;

4) по полученным из внутренней базы данных заданиям на маневрирование вдоль заданного маршрута провести полномасштабное имитационное моделирование в связанной системе координат;

5) результаты полномасштабного имитационного моделирования сохранить во внутренней базе данных, перевести в Земную систему координат и послать во внешнюю базу данных;

6) во время демонстрации синхронно с отображаемым движением МПО по карте (на основе результатов моделирования из внешней базы данных) проводить визуализацию результатов моделирования в связанной системе координат по сохраненным данным из внутренней базы данных.

Для реализации маневрирования МПО по отмеченному маршруту на карте было разработано специализированное программное обеспечение (ПО) *Wanderer*.

Архитектура ПО Wanderer

ПО Wanderer написано на C++11 с использованием библиотек Boost [4] (для реализации некоторого функционала отдельных модулей), Qt 5 [5], Qwt 6 [6] (для реализации графического интерфейса пользователя), Ogre 3D [7] (для отображения МПО).

Следует отметить также, что *Wanderer* опирается на разрабатываемую систему полномасштабного имитационного моделирования МПО и способствует ее развитию как в функциональном, так и в качественном плане.

ПО *Wanderer* можно разделить на следующие модули:

- *io* инкапсулирует работу с внешней базой данных (ВБД). В этом модуле собраны все запросы к ВБД и преобразование полученных данных для работы в инфраструктуре *Wanderer*;
- program_options содержит функционал работы с настройками приложения — запросы на получение значений тех или иных настроек из файла настроек или параметров вызова приложения;
- coordinate_transformer модуль преобразования координат из связанной системы координат в географическую;
- *trajectory_validator* реализует графический интерфейс пользователя и занимается диспетчеризацией работы двух подмодулей:
- trajectory_simulator проводит моделирование траектории — реализует заданный реперными точками маршрут с использованием полномасштабной имитационной модели движения МПО, работы технических средств управления и алгоритма малошумного маневрирования;
- trajectory_loader проводит фоновую загрузку набора координат из заданной промоделированной с помощью trajectory_simulator траектории из локальной базы данных (ЛБД) и отображение фазовых координат МПО на участке и в заданный момент времени.

Управление движением МПО на основе компьютерного имитатора Wanderer

Вычислительным ядром для ПО *Wanderer* служит разрабатываемая коллективом лаборатории ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН система полномасштабного имитационного моделирования (СИМ) движения МПО, структура которой приведена на рис. 2.

Непосредственно перед началом работы над *Wanderer* СИМ претерпела сильные изменения в первоначальной версии результаты проведения экспериментов сохранялись в файлах и группировались в виде папок. Но затем этот подход начал представляться не расширяемым и не достаточно гибким. В связи с этим было решено перейти на хранение результатов экспериментов в локальной базе данных (ЛБД). Сейчас для ЛБД используется *SQLite 3* [8], что достаточно для работы с не очень большой и не сильно нагруженной базы данных, которая не требует сложной настройки и запуска сервера системы управления базой данных — вся база данных хранится в одном файле.

Структура спроектированной ЛБД позволяет сохранять результаты экспериментов и собирать их в группы. Каждый эксперимент может включать несколько объектов различных типов (сейчас рас-



Рис. 2. Структура разрабатываемой СИМ (ТСУ — технические средства управления; МШМ — малошумное маневрирование; ФИП — функции информационной поддержки; СИП — система информационной поддержки)

сматривается только один класс МПО, но структура открыта для расширений новыми видами объектов). В ЛБД можно сохранить коэффициенты алгоритмов управления для различных наборов заданий, ограничений, параметров внешней среды и оценок качества переходного процесса.

Спроектированная база данных еще требует доработок. Многие недочеты были обнаружены и исправлены в ходе реализации *Wanderer*. В качестве очевидного узкого места можно указать желание проектировщика сделать набор обобщенных таблиц для хранения элементов фазовых координат МПО, что требует при записи или чтении состояния объекта обращения к нескольким таблицам. Более перспективным представляется оставление основного набора таблиц, реализующих логику экспериментов, сохранение коэффициентов алгоритмов управления и создание под каждый новый вид экспериментов своей таблицы, содержащей все необходимые в рамках эксперимента фазовые координаты.

Представленная структура базы данных позволяет проводить моделирование нескольких МПО в рамках одного эксперимента, группировку экспериментов, сохранение результатов проведения экспериментов (оценок качества переходного процесса), хранение информации об окружающей среде и пр.

СИМ, которая сама по себе является большой системой, при переходе на работу с ЛБД также расширила свои возможности (в том числе получила возможность моделирования нескольких объектов в рамках одного эксперимента вдобавок к уже имевшейся возможности проведения нескольких экспериментов одновременно).

Модуль іо

В этом модуле реализуется получение и запись данных ВБД. Особенностью рассматриваемой задачи является то, что маршрут движения МПО строится в географической системе координат, а управление МПО по заданному маршруту — в связанной, поэтому при получении данных — набора точек в географической системе координат — сначала происходит их перевод в связанную систему координат (модуль *coordinate_transformer*). Также проводится фильтрация точек маршрута — этот этап обработки необходим, чтобы преобразовать программно сгенерированные точки маршрута в удовлетворяющие здравому смыслу без потери информации. Например, рассмотрим маршрут, вид которого представлен на рис. 3.

Сгенерированная траектория может содержать точки, находящиеся друг под другом и означающие, что на данном этапе МПО должна погружаться или всплывать (рис. 3). Все эти точки объединяются в единое задание на переход по глубине с помощью кормовых или носовых рулей с заданной скоростью хода. При этом надо начинать всплытие после первой такой точки (самой нижней в серии, см. всплытие на рис. 3), а погружение — до первой, самой верхней в серии (случай раннего погружения представлен на рис. 3), иначе погружение будет проводиться с запозданием и не будут удовлетворены требования к реализации маршрута (случай позднего погружения см. на рис. 3). Для расчета того, насколько раньше надо проводить погружение с учетом ограничений на фазовые координаты движения МПО, потребуется выполнить еще немало исследований и экспериментов в СИМ.



Рис. 3. Пример маршрута и маневров всплытия/погружения



Рис. 4. Структура приложения

На рис. 4 приведена структура приложения *Wanderer*, на которой схематично показано взаимодействие модулей.

При сохранении результатов требуется постобработка: возникает необходимость проанализировать последовательность фазовых координат, чтобы разметить места проведения маневров, это может помочь стороннему программному обеспечению для отображения движения МПО в ускоренном масштабе времени. Чтобы не выполнять слишком медленную демонстрацию многочасового перехода по точкам маршрута, необходимо ускорить демонстрацию, но для того чтобы не пропустить места, заслуживающие более пристального внимания (переходные процессы), демонстрацию можно приостанавливать на соответствующих участках траектории, размеченных заранее оговоренным образом.

Модуль trajectory_validator

В этом модуле реализован весь графический интерфейс пользователя и осуществляется запуск двух независимых потоков, которые работают в фоне и выполняют различные задачи, позволяя решать две различные задачи: моделирование и отображение результатов моделирования.

Подмодуль trajectory_simulator

Данный модуль работает в отдельном потоке в ожидании сигнала к проведению моделирования. При получении такого сигнала с помощью модуля *io* начинается моделирование.

Сначала получается траектория (модуль *io*), которая затем преобразуется в набор заданий (модуль *io*). Задания представляют пары начального и конечного состояний МПО — переходных процессов в рамках маневров по маршруту. Они объединяют задание на переход по глубине, курсу и изменение скорости.

При этом до работы над *Wanderer* СИМ не обладала возможностью движения в направлении заданной точки, имелась лишь возможность перехода на заданный курс и стояла задача попадания в заданную точку по окончании маневра. Для этого пришлось дать СИМ возможность задавать курс парой координат в связанной системе координат и пересчитывать это задание каждый такт времени реализовать следящее управление.

В рамках проекта Wanderer было необходимо не только провести полномасштабное имитационное моделирование маневрирования МПО, но и сделать это движение по возможности скрытным, для чего было решено использовать два подхода. Во-первых, режим малошумного маневрирования, который представляет собой алгоритм управления энергетической установкой в зависимости от фазовых координат МПО (заглубление винта, курс, дифферент и т. д.). Этот алгоритм задает особый режим работы энергетический установки, который должен обеспечить низкую шумность объекта. В качестве недостатков этого алгоритма стоит отметить тот факт, что даже "зная" о задании на скоростной режим, он нещадно урезает скорость движения МПО до небольших и нешумных, что приводит к запаздыванию при длительном маневре — МПО требуется больше времени на реализацию маршрута. Второй использованный подход — ограничение фазовых координат движения МПО. Были установлены достаточные для обеспечения нормальной управляемости ограничения на углы отклонения горизонтальных кормовых и вертикальных рулей и значение дифферента. Подобные ограничения призваны еще больше уменьшить шумность объекта.

В ходе проведения экспериментов пришлось установить нижнюю границу задания на скорость для объекта, чтобы не попасть на инверсионные скорости. Также на малых скоростях МПО начинает издавать больше шумов.

С учетом всех этих факторов к полученным из модуля *io* заданиям на маневры добавляются необходимые алгоритмы управления (если происходит переход по глубине, добавляется соответствующий алгоритм, если такового не происходит, алгоритм не включается), ограничения на фазовые координаты движения МПО. После этого модуль сохраняет полученные дополненные задания в ЛБД и запускает СИМ.

СИМ осуществляет моделирование и оповещение остальных модулей об этапе проведения эксперимента. С целью минимизировать воздействие алгоритма малошумного маневрирования на время переходного процесса и до реализации алгоритма управления скоростью МПО в зависимости от времени прибытия в точку назначения было решено "включать" алгоритм малошумного маневрирования только на этапах совершения маневров (по глубине, курсу), а все оставшееся время, когда МПО движется сравнительно прямолинейно в направлении реперной точки, выключать особый режим работы энергетической установки и просто набирать необходимую для достижения цели скорость. Это позволяет уменьшить потери во времени до приемлемых значений.

Стоит отметить, что СИМ позволяет проводить моделирование переходного процесса с траектори-

ей длиной порядка сотен километров и проходить в окрестности реперных точек с точностью порядка нескольких десятков метров, что говорит о качестве разработанных алгоритмов управления и программного обеспечения СИМ, прошедшего, таким образом, некоторое боевое крещение при решении данной прикладной задачи.

Также стоит отметить небольшой недостаток рассматриваемого подхода, который состоит в том, что задания формируются один раз и навсегда и не подразумевают дополнения промежуточными заданиями. Есть мнение, что в ЛБД стоит сохранять "целевое задание", а внутри СИМ дать возможность полученное задание дополнять маневрами на усмотрение командира МПО. Подобного рода изменение в СИМ не предполагает сильных переработок, но повышает гибкость решения. Также, возможно, следует добавить генерацию промежуточных состояний в trajectory simulator, поскольку во время маневров по курсу с учетом ограничений на фазовые координаты МПО заметно отплывает от заданной прямой, соединяющей две реперные точки, и движется рядом с ней по направлению к следующей реперной точке, не пытаясь вернуться. При генерации маршрута следует указывать коридор, в котором МПО может безопасно маневрировать и скорректировать алгоритмы управления с учетом условия невыхода из заданного коридора. Для подобной корректировки необходимо будет рассмотреть различные маневры по курсу и начать маневр до подхода к реперной точке начала поворота.

По завершении моделирования *trajectory_simulator* вновь обращается к *io* для сохранения состояний МПО после моделирования. На данный момент сохранение проводится в ЛБД и ВБД по завершении каждого конкретного задания, т. е. по окончании перехода от одной реперной точки к другой. Частоту сохранения можно будет в будущем увеличить (для длительных переходов). После окончания моделирования *trajectory_simulator* ждет следующих указаний на моделирование, работая в фоновом режиме.

Подмодуль trajectory_loader

Для отображения смоделированной траектории в Wanderer используется модуль trajectory_loader. Он, как и trajectory_simulator, работает в фоновом режиме и ожидает сигнала к действию — номер траектории и момент времени для отображения. Получив данные, trajectory_loader отображает МПО в заданный момент времени, а также графики курса и глубины в часовой окрестности от заданной точки. Это необходимо для демонстрации переходных процессов.

В ходе реализации этого модуля были приняты важные проектные решения относительно ЛБД для ускорения работы, так как изначального быстродействия при текущей реализации ЛБД было недостаточно (сигналы на отображение МПО прихо-



Рис. 5. Визуализация перехода по глубине и курсу

дят каждую секунду, а выполнять поиск состояний МПО в ЛБД в окрестности заданного времени получалось небыстро). За счет некоторых компромиссов (отхода от обобщенности) и введения индексов для полей таблиц удалось добиться приемлемой скорости работы с БД.

На рис. 5 представлена визуализация переходного процесса по глубине и курсу с использованием подмодуля *trajectory_loader*.

Заключение

Работа над задачей реализации движения МПО вдоль заданной траектории привела к созданию системы *Wanderer* как надстройки над СИМ. Эта работа дала толчок к развитию и обогащению возможностей разрабатываемой СИМ и позволила опробовать многие подходы в рамках поставленной задачи, решить интересные проблемы движения МПО по заданному маршруту. Созданная система демонстрирует хорошие результаты и применяется для осуществления маневрирования по заданной траектории на карте как составная часть большого проекта.

Задача, подобная данной, уже решалась ранее В. Г. Борисовым и С. К. Даниловой, но имела свою специфику, а именно: маневрирование проводилось не в малошумном режиме, не накладывались ограничения на технические средства управления (углы отклонения рулей) и фазовые координаты (дифферент). Также отличительной особенностью *Wanderer* можно назвать развитую систему взаимодействия с несколькими базами данных, работу в рамках другой системы и синхронизацию с ней.

В качестве дальнейших перспектив развития хотелось бы отметить желание применить некоторые возможности библиотеки *Boost*:

1. Использовать *Boost. Units* для проверки соответствия типов физических величин в описываемых моделях различных классов МПО во время компиляции программы, что в конечном итоге повысит качество продукта в целом. 2. Применить *Boost.Numeric.Odeint* для внедрения гибкого механизма интегрирования с возможностями аппаратного ускорения и выбора различных вычислительных методов интегрирования.

3. Использовать *Quaternions* из *Boost.Math* для хранения и реализации поворотов МПО вместо углов Эйлера.

Список литературы

1. Данилова С. К., Кузьмин С. В., Кусков И. М. Теоретические и методические основы разработки управления движением морских подводных объектов в режиме "без хода" // Труды XII Всеросс. совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014). М.: ИПУ РАН, 2014. С. 3553—3563.

2. Васильев С. Н., Данилова С. К. Имитационное моделирование как метод исследования и проектирования комплексной системы управления классом морских подводных объектов // Труды 6-й Всеросс. научно-практической конференции "Имитационное моделирование. Теория и практика" (ИММОД-2013). Казань: Изд-во "ФЭН" Академии наук РТ, 2013. № 1. С. 35—45.

3. Аминев Б. Д., Данилова С. К. Использование пакета ОрепFOAM для исследования шумовых характеристик морского подводного объекта // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1 (162). С. 41—49.

4. **Boost C++ Libraries** [Электронный ресурс]. URL: http:// www.boost.org/ (дата обращения: 14.09.2016).

5. **Qt Home** [Электронный pecypc]. URL: https://www.qt.io (дата обращения: 14.09.2016).

6. Qwt User's Guide: Qt Widgets for Technical Applications [Электронный ресурс]. URL: http://qwt.sourceforge.net/ (дата обращения: 14.09.2016).

7. **OGRE** — Open Source 3D Graphics Engine | Home of a marvelous rendering engine [Электронный ресурс]. URL: http:// www.ogre3d.org/ (дата обращения: 14.09.2016).

8. **SQLite Home Page** [Электронный ресурс]. URL: https:// www.sqlite.org/ (дата обращения: 14.09.2016).

Design Automation for Marine Underwater Object Route Control

B. D. Aminev, daianovich@mail.ru, **S. K. Danilova,** lab45_1@ipu.ru⊠, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, 117997, Moscow

Corresponding author: Danilova Svetlana K., Ph.D., Leading Researcher, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russian Federation, e-mail: lab45_1@ipu.ru

> Received on September 14, 2016 Accepted on September 23, 2016

The paper concerns the design automation for the marine underwater object route control using "Wanderer" software. Marine underwater object (MUO) model is presented as a complex system of the non-linear differential equations of a high order. MUO control is a network structure by its nature (performed from several control stations). It is multidimensional, multichannel and carried out with the constrained maneuvering phase coordinates using several control facilities of the hydrodynamic and hydrostatic nature. The former group includes the hydrodynamic planes (rudder and planes), which allow MUO maneuver in space. The hydrodynamic plane's control efficiency depends on MUO velocity and their steering angles, permissive and actual values. The hydrostatic control facilities (balloons) are used, when a vessel is stopped. During the considered control mode we use balloons to make the ballast compensate for the squeezing forces and forces resulting from hydrology. Development of MUO maneuvering control algorithms, which are able to work correctly for several control modes, should be performed during investigation of MUO maneuvers with constraints on the intensity and a set of control facilities using a full-scale model of the object under consideration. In the process of realization of the route we have to ensure a maneuvering mode, in which MUO will make as little noises (acoustic, e. g.) as possible. In order to accomplish this task a muted noise maneuvering mode is used. This mode minimizes the cavitational noises based on an object's phase coordinates monitoring. "Wanderer" allows us to perform an automated maneuvering of MUO along the route in space utilizing the muted noise maneuvering mode algorithm with the additional phase coordinates' and object control facilities' constraints. "Wanderer" project gave an impulse to evolution and improvement of the facilities of the developed full-scale simulation system and allowed us to test many approaches and solve interesting problems. "Wanderer" has already been used as a part of a bigger project for solving of the set tasks and it produced good results.

Keywords: automation, control, full-scale simulation, marine underwater object, trajectory maneuvering, muted noise maneuvering, submarine

Acknowledgements: This work was supported by RFBR grant № 15-08-05133a.

For citation:

Aminev B. D., Danilova S. K. Design Automation for Marine Underwater Object Route Control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 202–207.

DOI: 10.17587/mau.18.202-207

References

 Danilova S. K., Kuz'min S. V., Kuskov I. M. Teoreticheskie i metodicheskie osnovy razrabotki upravlenija dvizheniem morskih podvodnyh ob#ektov v rezhime "bez hoda" (Theoretical and methodical foundation for development of control for marine underwater objects motion in "zero speed" mode), Trudy XII Vserossijskogo soveshhanija po problemam upravlenija (VSPU-2014), 2014, pp. 3553–3563 (in Russian).
 Vasil'ev S. N., Danilova S. K. Imitacionnoe modelirovanie kak

2. Vasil'ev S. N., Danilova S. K. Imitacionnoe modelirovanie kak metod issledovanija i proektirovanija kompleksnoj sistemy upravlenija klassom morskih podvodnyh ob#ektov (Imitational modeling as research and design method for the complex control system of the marine mobile objects class), *Trudy 6-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Imitacionnoe modelirovanie. Teorija i praktika" (IMMOD-2013)*, 2013, no. 1, pp. 35–45 (in Russian).

3. Aminev B. D., Danilova S. K. Ispol'zovanie paketa openfoam dlja issledovanija shumovyh harakteristik morskogo podvodnogo ob#ekta (Application of OpenFOAM package in research of marine underwater object noise characteristics), Izvestija Jufu. Tehnicheskie Nauki, 2015, no. 1 (162), pp. 41–49 (in Russian).

4. **Boost C++ Libraries**, available at: http://www.boost.org/ (accessing date: 14.09.2016).

5. **Qt Home** available at: https://www.qt.io (accessing date: 14.09.2016).

6. **Qwt User's Guide**: Qt Widgets for Technical Applications available at: http://qwt.sourceforge.net/ (accessing date: 14.09.2016).

7. **OGRE** — Open Source 3D Graphics Engine | Home of a marvelous rendering engine, available at: http://www.ogre3d.org/ (accessing date: 14.09.2016).

8. **SQLite Home Page,** available at: https://www.sqlite.org/ (accessing date: 14.09.2016).

В. М. Дорожко, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., veniamin_dorozhko@mail.ru, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

Энергия системы "контур морского судна — аномальная волна"

Рассмотрен CFD-метод исследования энергии изолированной системы "контур морского судна — аномальная волна". Предложена модель системы "контур морского судна — аномальная волна". Приведены результаты численного исследования максимальной плотности энергии и зависимости от времени энергии аномальных волн различной длины. Вычислены потери энергии аномальной волны, связанные с выполнением работы опрокидывания контура. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании судов и разработке мероприятий по обеспечению безопасного мореплавания.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, контур морского судна, аномальная волна, изолированная система, энергия аномальной волны, работа опрокидывания контура

Введение

Аномально высокие волны (далее — аномальные волны), известные также как "волны-убийцы" [1], представляют собой особый вид морских волн, характеризующихся высотой до 30 м, крутым фронтом и глубокой впадиной перед ним. Формально к аномальным относятся волны, которые превышают более чем в два раза высоту значительных волн (среднее значение 1/3 самых высоких волн моря). Первые фундаментальные работы [2, 3], раскрывающие механизм возникновения аномальных волн, относятся к 60-м годам прошлого столетия. Согласно теоретическим оценкам аномальная волна может возникнуть один раз в 20 лет [4]. Тем не менее, считается, что только за 26 лет (1968...1994 гг.) от встречи с аномальными волнами погибло 22 супертанкера [4]. В целях получения данных о реальной частоте возникновения аномальных волн и разработки предложений по безопасности морских судов были выполнены международные проекты "MaxWave" (2000...2003 гг.) [5] и "Extreme Seas" (2009...2012 гг.) [6], которые показали, что аномальные волны возникают существенно чаще. Например, только за 2006...2010 гг. аномальные волны были зарегистрированы в 78 случаях [7]. Для координации отечественных исследований в 2012 г. был создан Научный центр по изучению "волн-убийц" [8]. За рубежом аналогичными исследованиями занимается "Rogue Waves Research Project (MULTIWAVE)" [9], в состав которого от России входит академик В. Е. Захаров. Несмотря на интенсивные исследования, теория аномальных волн далека от своего завершения [10], соответственно, продолжается разработка эффективных рекомендаций по безопасности морских судов. Все это поддерживает актуальность исследования аномальных волн по самым различным научным направлениям, одним из которых является теоретическое и численное изучение процесса формирования аномальной волны [11, 12], начинающегося с модуляционной неустойчивости волн узкого спектра, продолжающегося в виде пространственно-временной концентрации энергии волн различных частот и завершающегося возникновением аномальной волны. В рамках другого направления исследуются процессы нелинейного преобразования в возникшей аномальной волне и динамические характеристики ее взаимодействия с препятствиями и судами [13-15]. Большое значение для безопасности судов имеют исследования энергетических характеристик аномальных волн. Например, в работе [16] показано, что на последней стадии формирования аномальной волны в ее гребне происходит резкая концентрация энергии, превышающая в десятки раз энергию гребней соседних волн. В работе [17] получен результат, свидетельствующий о том, что нелинейные процессы в аномальной волне приводят к дисбалансу соотношения между кинетической и потенциальной энергией. При этом вплоть до момента обрушения аномальной волны сумма потенциальной и кинетической энергии сохраняется с высокой точностью [18].

Соотношение энергии аномальной волны и работы опрокидывания в системе "контур морского судна — аномальная волна" может служить основой для оценки устойчивости судна при встрече с аномальной волной. В связи с этим в данной работе ставится задача выполнить численное исследование на глубоком море зависимости от длины аномальной волны высотой 30 м положения и значения максимальной плотности кинетической энергии в гребне аномальной волны; эволюции во времени ее кинетической, потенциальной и полной энергии; энергетических потерь аномальной волны, связанных с выполнением работы опрокидывания контура морского судна.

Основные модельные представления и метод решения задачи

Метод вычислительной гидродинамики (CFD — computational fluid dynamics) показал свою эффективность для численного моделирования аномальных волн [19]. В связи с этим вычисление энергии системы "контур морского судна — аномальная волна" выполнено с применением CFD-метода, который базируется на системе уравнений RANSE (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) [20], имеющих вид

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_i} \right] + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u'_i u'_j}) + \rho g, (2)$$

где $\{i, j\} = 1, 2, 3$ — индексы переменных в абсолютной системе координат $ox_1x_2x_3$; u'_1 , u'_2 , u'_3 флуктуации абсолютной скорости жидкости; u_1 , u_2 , u_3 — осредненные в масштабе флуктуаций значения абсолютной скорости; ρ и μ — плотность и физическая вязкость жидкости; t — время; p — давление; δ_{ij} — символ Кронекера; g — ускорение свободного падения; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ — напряжение Рейнольдса, которое вычислено в соответствии с моделью турбулентности $k_t - \varepsilon_t$, RNG (renormalization group mathematical technique) [21], k_t — кинетическая энергия турбулентности, а ε_t — скорость ее диссипации.

Численное исследование поставленной задачи выполнено в 2D-расчетной области, имеющей форму прямоугольника, в котором на поверхности воды расположен свободно плавающий контур морского судна (далее — контур), плоскость которого совпадает с плоскостью прямоугольника. Пространство выше поверхности воды заполнено воздухом. Для описания процессов в расчетной области выбрана координатная система охуг, совпадающая с системой $ox_1x_2x_3$ уравнений (1) и (2). Начало координат системы охуг расположено на поверхности воды на левой вертикальной границе. При этом ось ог направлена перпендикулярно плоскости расчетной области, а ось *оу* — вверх. Разбиение расчетной области выполнено в двух вариантах: первый — разбиение всей расчетной области, предназначенной для численных исследований энергии аномальной волны, выполнено квадратными сеточными элементами; второй — внутри расчетной области выделена область прямоугольной формы, охватывающая пространство движения контура, разбиение которой выполнено треугольными сеточными элементами, допускающими их перестройку во время движения контура. В остальном пространстве расчетной области разбиение проведено квадратными сеточными элементами. Этот вариант предназначен для численного исследования работы опрокидывания контура в системе "контур — аномальная волна".

Для вычисления движения контура выбрана связанная с центром тяжести контура система координат $o\xi\eta\zeta$, начало которой совпадает с центром тяжести контура. Оси $o\xi$ и $o\eta$ в начальный момент времени параллельны осям *ох* и *оу* соответственно. Угол поворота контура относительно оси $o\zeta$ равен углу между осями *ох* и $o\xi$, а его перемещение в горизонтальном или вертикальном направлениях соответствует изменению расстояния между началами координат систем *оху* и *о*ξηζ в соответствующем направлении.

Перечислим основные методы [20] решения уравнений (1) и (2). Для обеспечения решения уравнений расчетная область разбивалась сеточными элементами, что позволило сформировать с помощью метода конечного объема разностный аналог системы уравнений RANSE, которая решалась методом Гаусса—Зейделя. Применение алгоритма PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) обеспечило связь между полями скорости, давления и выполнение уравнения неразрывности. Схемы второго порядка точности применены для дискретизации полей давления и скорости. Дискретизация решения во временной области выполнена шагом, обеспечивающим устойчивость вычислений. Определение параметров движения контура под действием аномальной волны осуществлялось путем вычисления на каждом временном шаге Δt решателя векторов линейного $\mathbf{a}_{\mathbf{G}} = \mathbf{F}_{\mathbf{G}}/M_C$ и углового $\varepsilon_{\rm G} = {\rm M}_{\rm G}/J_{\rm C}$ ускорений контура, где ${\rm F}_{\rm G}$ и ${\rm M}_{\rm G}$ векторы силы перемещения и момента сил вращения, вычисленные относительно центра тяжести контура; M_C и J_C — масса и момент инерции масс контура соответственно. Для соблюдения размерности вычисляемых сил и моментов условно принято, что толщина контура равна 1 м. На основе вычисленных ускорений в конце каждого временного шага контур перемещался на расстояние, равное модулю вектора $\Delta \mathbf{l} = 0,5 \mathbf{a}_{\mathbf{G}} \Delta t^2$ и поворачивался на угол $\Delta \theta = 0.5 | \varepsilon_{\mathbf{G}} | \Delta t^2$. Положение границы раздела "воздух-вода" определялось методом "объема жидкости" (VOF — Volume of fluid method) [22], согласно которому в каждом сеточном элементе вычислялась доля воды. Полученные данные использовались для аппроксимации профиля аномальной волны.

Решение системы уравнений (1), (2) получено для следующих типов граничных условий: на нижней и верхней границах расчетной области и периметре контура граничные условия соответствуют абсолютно жесткой границе, на которой нормальная компонента скорости жидкости равна нулю. На выходе расчетной области (правая вертикальная граница) выполняется условие соответствия давления на границе давлению в воде. На входе расчетной области (левая вертикальная граница) граничное условие представлено вектором скорости воды, втекающей в расчетную область. Для определения компонент указанного вектора был выбран профиль аномальной волны с одним высоким максимумом и двумя смежными возвышениями [23], начальное состояние (t = 0) которого можно описать выражением

$$w = a_b \exp\left[-2\left(\frac{k_b(x-x_b)}{2\pi}\right)^2\right] \cos[k_b(x-x_b)], \quad (3)$$

где $a_b, k_b = 2\pi/\lambda_b$ и λ_b — начальная амплитуда, волновое число и длина волны соответственно; x_b —

координата начального положения центрального максимума волны.

В соответствии с условием поставленной задачи следует обеспечить высоту аномальных волн, равной 30 м. Выбор таких волн был осуществлен с применением специальной процедуры. На первом этапе проведено численное моделирование CFDметодом базовых волн вида (3) длиной 100 м, высотой от 8 до 12 м и координатой начального положении 200 м, в результате которого вычислены максимальные высоты (H_b) указанных волн, которые они приобретают в процессе нелинейных преобразований. При этом установлено, что волны вне указанного диапазона амплитуд не могут представлять опасности для судов, так как волны с амплитудой (a_b) менее 8 м имеют незначительную крутизну ($S_b = \pi H_b / \lambda_b$) менее 0,4 и не создают опрокидывающих моментов, а волны с амплитудой более 12 м имеют крутизну более 0,7, поэтому быстро обрушаются, сокращая, тем самым, время воздействия на контур и не опрокидывают его. На втором этапе вычислены масштабирующие коэффициенты по формуле $m_b = H_r/H_b$, где H_r – принятая максимальная высота аномальной волны, равная 30 м. Умножение соответствующих значений масштабирующих коэффициентов на параметры базовых волн (a_b , λ_b и x_b) позволило получить массивы значений начальных амплитуд (a_r), длин волн (λ_r) и координат начального положения (x_r) максимума аномальных волн (табл. 1). Выражение (3) после замены параметров a_b , λ_b , x_b на a_r , λ_r, x_r представляет собой описание в начальный момент времени (t = 0) формы профиля аномальных волн высотой $H_r = 30$ м.

Параметры базовых и аномальных волн

Таблица 1

Базовые волны					ш.	Анома	альные	волны
<i>а_b</i> , м	λ _b , м	<i>х_b</i> , м	<i>Н</i> _b , м	S_b	ть	<i>а_г</i> , м	λ _r , м	<i>х_г</i> , м
8	100	200	15,5	0,49	1,74	13,92	174	348
9	100	200	17,2	0,54	1,49	13,41	149	298
10	100	200	18,8	0,59	1,38	13,80	138	276
11	100	200	20,5	0,64	1,30	14,30	130	260
12	100	200	22,0	0,69	1,20	14,40	120	240

В расчетной области профиль (3) аномальной волны может быть представлен в виде массива дискретных значений w_i (i = 0, ..., N - 1) от дискретного аргумента $x = x_0, ..., x_i, ... x_{N-1}$, где N и i — число и порядковый номер сеточных элементов в расчетной области соответственно. Пространственный спектр комплексных амплитуд Y_n массива w_i дискретных значений начального профиля аномаль-

ной волны вычислен с помощью дискретного преобразования Фурье:

$$Y_n = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} w_{i+1} \exp(-j2\pi n i/N), \ n = 1, \ ..., \ N, \ (4)$$

где *j* — комплексная единица.

Указанный спектр представляет массив комплексных спектральных составляющих, амплитуды которых уменьшаются к его краям. В связи с этим из состава спектра исключены крайние спектральные составляющие, что позволило избежать чрезмерного увеличения как геометрических размеров расчетной области, так и числа сеточных элементов. На основе пространственного спектра (4) граничное условие на входе расчетной области представлено вектором скорости воды, горизонтальная u_x и вертикальная u_y проекции которого на оси *ох* и *оу*, соответственно, имеют вид

$$u_x = \sum_{n=l}^{L} u_n \exp(k_n y) \cos(k_n x_0 - \sigma_n t + \varphi_n); \qquad (5)$$

$$u_y = \sum_{n=l}^{L} u_n \exp(k_n y) \sin(k_n x_0 - \sigma_n t + \varphi_n), \qquad (6)$$

где $u_n = gk_n |Y_n| / \sigma_n$ — амплитуда скорости; $|Y_n|$ — модуль *n*-й спектральной составляющей; *g* — ускорение свободного падения; $k_n = 2\pi/\lambda_n$ — волновое число; $\sigma_n = \sqrt{gk_n}$ — угловая частота; x_0 — координата входной границы расчетной области; φ_n — значение фазового угла *n*-й компоненты пространственного спектра, *l* и *L* — номера комплексных спектральных составляющих левой и правой границ усеченного спектра соответственно.

Особенностью численных исследований энергетических характеристик является соблюдение условия изолированности расчетной области. С этой целью в начальный момент времени (t = 0) в расчетной области с помощью компонент скорости (5) и (6) создается аномальная волна, что имитирует состояние аномальной волны в момент ее возникновения. После этого компонентам скорости (5) и (6) на входе в расчетную область придаются нулевые значения, что исключает подпитку расчетной области энергией через входную границу. Граничные условия верхней, нижней и выходной границ остаются без изменения. Перенос энергии через выходную границу исключен, в связи с тем, что величина аномальной волны вдали от ее центрального максимума всегда равна нулю. После включения вычислений аномальная волна движется, развивается за счет нелинейных преобразований и взаимодействует с контуром за счет энергии, которую она приобрела в начальный момент формирования.

Выражения (1)—(6), включая методы численного решения, формулировку граничных и начальных условий, обоснование параметров аномальных

Тип, вс	одоизмещение	морских	судов	И	параметры	ИХ	контуров
---------	--------------	---------	-------	---	-----------	----	----------

	Параметры контуров						
Тип и водоизмещение судна, т	Ширина, м	Высота, м	Осадка, м	Масса, кг	Момент инерции, кг • м ²	Начальная метацент- рическая высота, м	
Танкер тип "Интернационал", 27000 РТМКС тип "Моонзунд", 9260 СРТМ тип "Иван Шаньков", 1389	22,4 19,0 11,0	12,3 12,2 7,3	9,4 6,6 5,2	206 697 123 683 56 100	12 427 869 5 693 432 670 767	1,0 0,5; 1,0 0,5; 1,0	

волн, представляют в совокупности модель изолированной системы "контур — аномальная волна".

Численное исследование энергии системы "контур — аномальная волна" и обсуждение результатов

Численное исследование проведено в расчетной области, имеющей форму прямоугольника длиной $5\lambda_r$, высотой $2\lambda_r$ и глубиной воды $h_r = 1, 5\lambda_r$, обеспечивающей условие глубокого моря ($h_r > 0.5\lambda_n$, n = l, ..., L) для всех спектральных компонент усеченного спектра. Длина стороны сеточных элементов выбрана равной d = 0,5 м, плотность воды — $\rho = 1027$ кг/м³, ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/c}^2$. Для обеспечения устойчивости вычислений шаг (Δt) дискретизации времени процесса решения выбран равным 0,0005 с, при котором максимальное число Куранта ($C = \Delta t u_{\text{max}}/d$, где *u*_{max} — максимальное значение скорости жидкости в расчетной области) не превышало 0,25. Усечение спектра (4) проведено в отношении его боковых спектральных составляющих, значение которых не превысило 10 % от наибольшей спектральной составляющей. Для численного исследования выбраны морские суда [24] (табл. 2), которые, ввиду длительного пребывания в море, могут встретиться с аномальными волнами. Значения начальных метацентрических высот соответствуют рекомендациям для указанных судов.

Численное исследование энергии системы "контур — аномальная волна" выполнено в два этапа. На первом этапе вычислено распределение плотности кинетической энергии на профилях каждой аномальной волны (см. табл. 1) в целях выбора наиболее энергонасыщенного профиля, абсцисса координат которого использована для установки контура на поверхности воды. Вычислена эволюция во времени кинетической, потенциальной и полной энергии каждой аномальной волны, что позволило оценить среднее значение ее полной энергии. На втором этапе для оценки потерь энергии в системе "контур — аномальная волна" вычислена работа опрокидывания каждого контура и соотнесена со средним значением полной энергии каждой аномальной волны. Так как в пределах одного метра фронта волны можно считать однородными поля скорости и давления, то указанные энергетические характеристики отнесены к фронту аномальной волны шириной 1 м. В связи с этим условный размер сеточных элементов в направлении оси *ог* расчетной области также принят равным 1 м.

На рис. 1 представлена временная последовательность состояний (профилей) аномальной волны длиной 138 м.

В начальный момент времени аномальная волна имеет профиль (A), который с течением времени принимает форму профиля с первым максимумом высоты (B), который преобразуется в двугорбый профиль (C). Стремительное преобразование профиля (C) приводит к формированию профиля со вторым максимумом высоты (D), скорость воды в котором превышает фазовую скорость волны, что приводит к образованию струи (F), обрушающейся на поверхность воды. Вид профилей и их последовательность является типичной для аномальных волн, представленных в табл. 1.

Для каждого профиля *А* — *F* аномальной волны вычислены максимальные значения плотности ки-

нетической энергии по формуле
$$e_k = \sum_{i=1}^{R} \frac{\rho u_i^2}{2}$$
, где



Рис. 1. Временная последовательность профилей аномальной волны:

A — начальный профиль, B — профиль с первым максимумом высоты, C — двугорбый профиль, D — профиль со вторым максимумом высоты, F — профиль со струей, обрушающейся на поверхность волы; $k_r = 2\pi/\lambda_r$ — волновое число, λ_r — длина аномальной волны; x и y — абсцисса и ордината в системе координат *аху* расчетной области. Точки *a*, *b*, *c*, *d*, *f* — области с максимальными значениями плотности кинетической энергии

 u_i — скорость движения воды в *i*-м сеточном элементе; R — число сеточных элементов, заполненных водой. Точками a, b, c, d, f обозначены положения областей с максимальным значением плотности кинетической энергии на профилях аномальной волны. Положения точек *а* — *f* являются типичными для рассматриваемых аномальных волн. От каждой из указанных точек на профилях *А* — *F* построены изолинии плотности кинетической энергии. Плотность кинетической энергии между смежными изолиниями по мере удаления от точек a - fуменьшается на 10 %, что дает представление о пространственном распределении плотности кинетической энергии на поверхностях профилей, а также о направлении вектора скорости воды, который направлен в сторону точек a - f и перпендикулярен изолиниям. Из анализа рис. 1 следует, что в процессе развития аномальной волны (профили A, B) точки максимального значения плотности кинетической энергии располагаются на вершинах гребней, на профиле С — между горбами. На профиле со вторым максимумом высоты (профиль D) максимум плотности кинетической энергии переме-

Таблица 3 Максимальная плотность кинетической энергии аномальных волн, Дж/м³

Длина	Положение максимальных значений плотности кинетической энергии							
волны, м	а	b	с	d	f			
120 130 138 149 174	301 200 242 900 189 200 148 400 127 500	196 600 161 800 131 000 108 000 94 800	350 100 316 400 289 100 249 700 212 300	405 700 366 400 310 400 258 500 220 500	546 400 520 800 475 400 422 100 377 900			



Рис. 2. Эволюция во времени кинетической, потенциальной и полной энергии аномальных волн:

1, 2, 3, 4, 5 — полная энергия, 6, 7, 8, 9, 10 — кинетическая энергия, 11, 12, 13, 14, 15 — потенциальная энергия аномальных волн длиной 174, 149, 138, 130, 120 м соответственно; A, B, C, D, F — моменты времени, соответствующие времени формирования одноименных профилей (см. рис. 1); T_r — период аномальной волны

щается на фронт профиля, существенно ниже вершины гребня. Указанный профиль является самым опасным для сохранения устойчивости контуром, так как обладает максимальной плотностью кинетической энергии перед обрушением аномальной волны. В последующие моменты времени скорость жидкости превышает фазовую скорость фронта профиля (D), что приводит к образованию струи, обрушающейся на поверхность воды. На завершающем этапе максимум плотности энергии смещается на оконечность струи (профиль F). Вычисленные значения максимальной плотности кинетической энергии для аномальных волн длиной от 120 до 174 м сведены в табл. 3. Полученные данные свидетельствуют об увеличении максимальной плотности кинетической энергии по мере развития аномальной волны, которая приобретает наибольшее значение в процессе обрушения волны. При этом с увеличением длины аномальной волны уменьшается максимальное значение плотности кинетической энергии.

На рис. 2 представлены диаграммы зависимости от времени кинетической, потенциальной и полной (суммарной) энергии аномальных волн. Кинетическая энергия E_k вычислена по формуле

$$E_k = \sum_{i=1}^{R} \frac{m_i u_i^2}{2}$$
, где *i* — номер сеточного элемента;

 $m_i = \rho b d^2$ и u_i — масса и скорость движения воды в сеточном элементе соответственно; d — размер стороны квадратного сеточного элемента; b = 1 условный размер сеточного элемента в направлении оси *оz*; R — число сеточных элементов в расчетной области, заполненных водой. Потенциальная энергия аномальной волны складывается из потенциальной энергии гребня и боковых возвышений,

вычисляемой по формуле $E_c = \sum_{i=1}^{R} gm_i y_i (y_i > 0$ —

ординаты центров сеточных элементов в гребне центрального максимума и боковых возвышениях) и энергии, равной работе вытеснения воды из лож-

бин аномальной волны, $E_t = \sum_{i=1}^{R} gm_i |y_i|, (y_i < 0 -$

ордината ячеек в ложбинах).

Из рис. 2 следует, что кинетическая и потенциальная энергия изменяются в противофазе. Максимальная потенциальная энергия (минимальная кинетическая) соответствуют двугорбому профилю (C), что объясняется увеличением его ширины и перемещением в ложбину между горбами области с максимальной плотностью кинетической энергии. Резкое понижение потенциальной энергии (кривые 13—15) коротких аномальных волн с длинами 138...120 м связано с уменьшением ширины их гребней и интенсивным обрушением в момент времени F соответственно. Превышение полной энергии длинноволновых (149...174 м) аномальных волн (кривые 1, 2) относительно коротковолновых (кривые 3-5) обусловлено относительно большим числом сеточных элементов и размеров расчетной области длинноволновых аномальных волн. По мере увеличения t/T_r кинетическая энергия аномальной волны возрастает, что подтверждает ранее сделанный вывод об увеличении максимальной плотности кинетической энергии по мере развития аномальной волны. Несмотря на принятые меры по обеспечению изолированности расчетной области, полная энергия (кривые 1-5) аномальных волн длиной 174, 149, 138, 130, 120 м снижается со скоростью 1,6; 2,9; 4,2; 6,3; 11 МДж/с, соответственно. Диссипация энергии обусловлена учетом в уравнениях (1) и (2) физической (µ) и турбулентной вязкости ($\mu_t = 0,0845 \rho k_t^2 / \varepsilon_t$). Наибольшая диссипация энергии свойственна коротковолновым аномальным волнам (4 и 5) ввиду наличия в них высокой плотности кинетической энергии (табл. 3) и соответствующих ей интенсивных турбулентных процессов. Максимальная диссипация энергии на физической и турбулентной вязкости в течение периода рассмотренных аномальных волн составила 3,4 %.

Для создания условий, максимально способствующих опрокидыванию, контур устанавливался на поверхности воды с таким расчетом, чтобы в процессе вычислений его положение совпало с абсциссой второго максимума аномальной волны, характеризующегося наибольшей плотностью кинетической энергии гребня перед его обрушением. Работа (A) опрокидывания контура аномальной волной представляет собой сумму работы момента сил вращения (A_M) относительно оси о ζ и работы (A_F) сил перемещения контура в системе координат *оху*. Указанные компоненты работы вычисля-

лись по формулам $A_M = \sum_{j=1}^{P} M_j \omega_j \Delta t, M_j$ и ω_j — мо-

мент сил и угловая скорость вращения контура на *j*-м шаге вычислений соответственно; $P = T_c/\Delta t$ число шагов суммирования в процессе вычислений; T_c — время, соответствующее моменту опрокидывания контура; Δt — шаг временной дискретизации вычислений; $A_F = \sum_{j=1}^{P} F_j V_j \Delta t$, на каждом шаге *j* вы-

J = 1числяли $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ и $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$; F_x , V_x и F_y , V_y — проекции силы F и скорости V перемещения контура на оси *ох* и *оу* соответственно.

На рис. З представлены диаграммы зависимости от длины аномальной волны среднего значения ее полной энергии \overline{E} ; среднего значения полной энергии \overline{E}_{λ} , нормированной к длине волны; работы A_1-A_5 опрокидывания контуров. Среднее значение полной энергии вычислено путем осреднения по времени полной энергии аномальных волн, представленных на рис. 2.

Среднее значение относительной разности работ A₂ и A₃ опрокидывания, связанной с различными метацентрическими высотами, не превышает 2,3 %, для A_4 и $A_5 - 2,2$ %. Это объясняется тем, что опрокидывание происходит после того, как волна накрывает контур, что исключает формирование сил остойчивости, зависящих от метацентрической высоты. Некоторый рост работ $A_1 - A_5$ с увеличением длины аномальных волн обусловлен соответственным увеличением времени (Т_с) опрокидывания контуров. Для установления граничного значения водоизмещения, соответствующего малоподвижному препятствию, выбран танкер водоизмещением 27 000 т, максимальный крен которого на аномальных волнах не превысил 30°. Потеря энергии аномальной волной в рассматриваемой изолированной системе "контур — аномальная волна" равна выполняемой ею работе опрокидывания контура. В связи с этим отношение работ $A_1 - A_5$ к энергии \overline{E} можно рассматривать как относительную величину потерь энергии аномальной волны на опрокидывание контуров (табл. 4). При этом работы A_2 и А3, А4 и А5 опрокидывания контуров для метацентрических высот 0,5 и 1,0 усреднены, как отмечалось выше, ввиду их незначительного различия.



Рис. 3. Диаграммы энергии аномальных волн и работы опрокидывания контуров:

 \overline{E} — среднее значение полной энергии; \overline{E}_{λ} — среднее значение полной энергии, нормированное к длине волны; A_1 — работа опрокидывания контура судна водоизмещением 27 000 т с метацентрической высотой 1,0; A_2 , A_3 и A_4 , A_5 — работа опрокидывания контуров судов водоизмещением 9260 и 1389 т с метацентрическими высотами 1,0, 0,5 соответственно

Таблица 4

Относительные потери энергии аномальной волны на опрокидывание контура, %

Водоизмещение	Длина аномальной волны, м					
судна, т	120	130	138	149	174	
27 000 9260 1389	39,01 28,80 10,77	38,30 28,11 12,63	39,46 28,16 13,81	36,64 26,43 12,63	34,33 27,15 12,24	

По мере увеличения длины аномальной волны относительные потери энергии на опрокидывание контуров судов водоизмещением 27 000 и 9260 т снижаются, что объясняется, с одной стороны, уменьшением полной энергии (рис. 3, \overline{E}_{λ}), нормированной к длине волны, а с другой — уменьшением максимальных значений плотности кинетической энергии (см. табл. 3) аномальных волн. Максимальные значения потерь энергии аномальной волной на опрокидывание контуров судов водоизмещением 92 600 и 27 000 т и диссипацию на физической и турбулентной вязкостях составили 32,2 и 42,9 % соответственно. Таким образом, работа A₁ может служить максимальным (предельным) значением потери среднего значения полной энергии аномальной волны при встрече с контуром малоподвижного судна или предельным значением работы опрокидывания контура на аномальной волне.

Заключение

Задача, поставленная в настоящей работе, решена. Выполнены на глубоком море численные исследования энергии системы "контур морского судна — аномальная волна". После возникновения аномальной волны ее высота продолжает увеличиваться за счет нелинейных процессов, достигая 30 м. При этом в течение одного периода форма профиля гребня изменяется, процесс завершается обрушением аномальной волны. Аномальные волны характеризуются высокой энергонасыщенностью, потери энергии аномальной волны на опрокидывание растут с увеличением водоизмещения судов и достигают предельной величины в 40 % от среднего значения полной энергии аномальной волны. Полученные результаты могут быть применены, во-первых, для развития численных исследований на основе CFD-метода, который демонстрирует высокую эффективность численных исследований аномальных волн; во-вторых, в качестве исходных данных при проектировании судов для повышения их устойчивости к опрокидыванию аномальной волной; в-третьих, для поиска причин известных случаев [4] гибели судов, которые из-за большого водоизмещения не могли быть опрокинуты аномальной волной.

Результаты вычислений получены с использованием оборудования ЦКП "Дальневосточный вычислительный ресурс" ИАПУ ДВО РАН.

Список литературы

1. Kharif C., Pelinovsky E. and Slunyaev A. Rogue waves in the ocean. Berlin: Springer, 2009. 215 p.

2. **Benjamin T. B., Feir J. E.** The disintegration of wave trains in deep water // J. Fluid. Mech. 1967. V. 27. P. 417–430.

3. Zakharov V. E. Stability of periodic waves of finite amplitude on the surface of a deep fluid // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1968. V. 9, N. 2. P. 190-194.

4. **Пелиновский Е. Н., Слюняев А. В.** "Фрики" — морские волны-убийцы // Природа. 2007. № 3. С. 14—23.

5. **Rosenthal W., Lehner.** Rogue Waves: Results of the MaxWave Project // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2008. V. 130. P. 1–8.

6. **Extreme Seas**. Design for ship safety in extreme seas. URL: https://www.hse.ru/data/2011/10/12/1270460467/ES%202011sep17.pdf (Дата обращения: 12.04.2016).

7. Nikolkina I., Didenkulova I. Rogue waves in 2006–2010 // Natural hazards and Earth system sciences. 2011. V. 11. P. 2913–2924.

8. Научный центр по изучению "волн-убийц". URL: http:// roguewaves.ru (Дата обращения: 12.04.2016).

9. Rogue waves research project. URL: http://www.ercmultiwave.eu (Дата обращения: 12.04.2016).

10. **Ruban V., Kodama Y., Ruderman M.** et al. Rogue waves — towards a unifying concept: Discussions and debates // The European physical journal special topics. 2010. Iss. 185. P. 5-15.

11. Шамин Р. В. Моделирование волн-убийц на основе эволюционных дифференциальных включений // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5, № 1. С. 14–23.

12. Кузнецов С. Ю., Сапрыкина Я. В. Экспериментальные исследования возникновения волн-убийц при эволюции узкого спектра крутых волн // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5, № 1. С. 52—63.

13. **Пелиновский Е. Н., Шургалина Е. Г.** Аномальное усиление волны вблизи вертикальной преграды // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. Т. 10, № 4. С. 29–38.

14. **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.

15. **Ming Wu, Bo Yang, Zuochao Wang** et al. Prediction of Ship Motions in Head Waves Using RANS Method // Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece. 2012. June 17–22. P. 1112–1117.

16. Zaharov V. E., Shamin R. V., Yudin A. V. Energetic portrait of the rogue waves // JETP Letters. 2014. V. 99, N. 9. P. 514–517.

17. Sergeeva A. and Slunyaev A. Rogue waves, rogue events and extreme wave kinematics in spatio-temporal fields of simulated sea states // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2013. N. 13. P. 1759–1771.

18. **Чаликов Д. В.** Портрет волны-убийцы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5, № 1. С. 5—13.

19. Дорожко В. М. Устойчивость контура морского судна к опрокидыванию волной-убийцей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 17, № 12. С. 852—860.

20. **Ferziger J. H.** Computational Methods for Fluid Dynamics. Berlin: Springer, 2002. 431 p.

21. Yakhot V., Orszag S. Renormalization group analysis of turbulence: Basic theory // Journal of scientific computing. 1986. V. 1, N. 1. P. 1-51.

22. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries // Comp. Phys. 1981. V. 39, N. 1. P. 201–225.

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. Флот рыбной промышленности. Справочник типовых судов. М.: Транспорт, 1990. 381 с.
Energy of the Sea Craft Contour – Anomalous Wave System

V. M. Dorozhko, veniamin_dorozhko@mail.ru⊠, Institute of Automation and Control Processes, Far East Branch, Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), Vladivostok, 690041, Russian Federation

> Corresponding author: Dorozhko Veniamin M., Ph.D., Senior Researcher, Institute of Automation and Control Processes, Far East Branch, Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), Vladivostok, 690041, Russian Federation e-mail: veniamin_dorozhko@mail.ru

> > Received on May 20, 2016 Accepted on June 15, 2016

The article is devoted to a numerical study of the contour — anomalous wave system and the quantitative estimates of its energy parameters. The author discovered that the profile of an anomalous wave undergoes the following stages: the initial profile, the profile with the first maximum height, the two-humped profile, the profile with a second maximum height, and the breaking profile. The problem is solved by CFD method in three stages. At the beginning the density maximum of the kinetic energy and its position on the anomalous wave profiles was calculated. It was discovered that the anomalous wave profile with the second maximum has the highest energy density and presents the greatest danger to the contour stability. Then, the numerical studies demonstrated that the kinetic energy increased as we approached the time of the anomalous wave collapse. It was discovered that the sum of the kinetic and potential energies is reduced due to the dissipation associated with the physical and turbulent viscosity. Eventually, we calculated the contour capsizing work. It was revealed that the anomalous wave energy loss corresponded to the contour capsizing work and increased with the vessel displacement. The relative value limit of the anomalous wave energy losses on bad moving contour reached 40 %. The received results can be used, firstly, for development of CFD based numerical studies. Secondly, the results can be used as the database for improvement of the design of the vessels, and also as a motive to search for causes of shipwrecks of vessels over 27000 tons, which did not capsize due to anomalous wave.

Keywords: computational fluid dynamics, anomalous wave, isolated system, density of energy, kinetic and potential energies, contour of a sea craft, capsizing work, losses of energy

For citation:

Dorozhko V. M. Energy of the Sea Craft Contour—Anomalous Wave System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 208—215.

DOI: 10.17587/mau.18.208-215

References

1. Kharif C., Pelinovsky E. and Slunyaev A. Rogue waves in the ocean. Berlin. Springer. 2009. 215 p.

2. Benjamin T. B., Feir J. E. The disintegration of wave trains in deep water, *Journ. Fluid. Mech*, 1967, vol. 27, pp. 417–430.

3. Zakharov V. E. Stability of periodic waves of finite amplitude on the surface of a deep fluid, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1968, vol. 9, no. 2, pp. 190–194.

4. **Pelinovskij E. N., Slyunyaev A. V.** "Friki" – morskie volnyubijcy (Freaks – sea rogue waves), Priroda, 2007, no. 3, pp. 14–23 (in Russian).

5. **Rosenthal W., Lehner.** Rogue Waves: Results of the MaxWave Project, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2008, vol. 130, pp. 1–8.

6. **Extreme Seas**. Design for ship safety in extreme seas. Available at: http://tra2014.traconference.eu/papers/pdfs/TRA2014_Fom_28494.pdf

7. Nikolkina I., Didenkulova I. Rogue waves in 2006–2010, Natural hazards and Earth system sciences, 2011, vol. 11, pp. 2913–2924.

8. *Nauchnyj centr po izucheniyu "voln-ubijc"* (Scientific Center for the Research of the rogue waves). Available at: http://roguewaves.ru

9. **Rogue** waves research project. Available at: http://www.erc-multiwave.eu.

10. **Ruban V., Kodama Y., Ruderman M.** et al. Rogue waves — towards a unifying concept: Discussions and debates, *The European physical journal special topics*, 2010, Iss. 185, pp. 5–15.

11. Shamin R. V. Modelirovanie voln-ubijc na osnove ehvolyucionnyh differencial'nyh vklyuchenij (Simulation of the rogue waves on the basis of evolutionary differential inclusions), *Fundamental'naya i* prikladnaya gidrofizika, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 14–23 (in Russian).

12. Kuznecov S. Yu., Saprykina Ya. V. Eksperimental'nye issledovaniya vozniknoveniya voln-ubijc pri ehvolyucii uzkogo spektra krutyh voln (Experimental studies of the rogue waves emergence in the evolution of a narrow range of steep waves), *Fundamental'naya i priklad-naya gidrofizika*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 52–63 (in Russian).

13. Pelinovskij E. N., Shurgalina E. G. Anomal'noe usilenie volny vblizi vertikal'noj pregrady (Abnormal amplification of the wave near the vertical barriers), *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2010, vol., 10, no. 4, pp. 29–38 (in Russian).

14. 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.

15. Ming Wu, Bo Yang, Zuochao Wang et al. Prediction of Ship Motions in Head Waves Using RANS Method, *Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference.* Rhodes, Greece. 2012. June 17–22, pp. 1112–1117.

16. Zaharov V. E., Shamin R. V., Yudin A. V. Energetic portrait of the rogue waves, *JETP Letters*, 2014, vol. 99, no. 9, pp. 514–517.

17. Sergeeva A. and Slunyaev A. Rogue waves, rogue events and extreme wave kinematics in spatio-temporal fields of simulated sea states, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, no. 13, pp. 1759–1771.

18. **Chalikov D. V.** *Portret volny-ubijcy* (Portrait of the rogue wave), *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 5–13 (in Russian).

19. **Dorozhko V. M.** Ustojchivosť kontura morskogo sudna k oprokidyvaniyu volnoj-ubijcej (The stability of seagoing vessel contour to capsizing by the rogue wave), Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie, 2015, vol. 17, no. 12, pp. 852–860 (in Russian).

20. Ferziger J. H. Computational Methods for Fluid Dynamics. Berlin: Springer, 2002. 431 p.

21. Yakhot V., Orszag S. Renormalization group analysis of turbulence: Basic theory, *Journal of scientific computing*, 1986, vol. 1. no. 1, pp. 1-51.

22. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, *Comp. Phys.*, 1981, vol. 39, no. 1, pp. 201–225.

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. Flot rybnoi promyshlennosti. Spravochnik tipovykh sudov (Fleet fishing industry. Handbook of model ships), Moscow, Transport, 2012, 381 p. (in Russian).

25—30 сентября 2017 г.

в пос. Дивноморское Геленджикского района Краснодарского края состоится

10-я Всероссийская Мультиконференция ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ (МКПУ-2017)

Председатель Президиума мультиконференции академик РАН **В. Г. Пешехонов**

Состав мультиконференции

 Локальная научно-техническая конференция "Модели, методы и технологии интеллектуального управления" (ИУ-2017)

Председатель программного комитета конференции — академик РАН С. Н. Васильев Заместители председателя: А. П. Бельтюков, О. П. Кузнецов, Д. А. Новиков, Н. Б. Филимонов

Секции конференции:

- Интеллектуализация систем
- Эргатические проблемы человекомашинных систем
- Управление в организационных системах
- Локальная научно-техническая конференция "Робототехника и мехатроника" (РМ-2017)

Председатель программного комитета конференции — академик РАН **Ф. Л. Черноусько** Сопредседатель — академик РАН **И. А. Каляев**

Локальная научно-техническая конференция
"Управление в распределенных и сетевых системах" (УРСС-2017)

Председатель программного комитета конференции — академик РАН **И. А. Каляев** Сопредседатель — академик РАН **И. В. Бычков**

Секретариат Мультиконференции МКПУ-2017 и конференции УРСС-2017 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2, НИИ МВС ЮФУ Т/ф: + 7 (8634) 61-54-59, 36-13-13 E-mail: mail@niimvs.ru Кухаренко Анатолий Павлович, к.т.н. Иванова Наталья Юрьевна

Подробную информацию о Мультиконференции см. на сайте: http://www.conf.mvs.sfedu.ru

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор Е. В. Комиссарова.

Сдано в набор 27.12.2016. Подписано в печать 09.02.2017. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН317 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 "Адвансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Адвансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.

Рисунок к статье А. А. Бошлякова, В. В. Ковалев, В. И. Рубцов «АВТОМАТИЗАЦИЯ ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ СКАНЕРОВ ОЛС. ЧАСТЬ 1»



Рис. 1. Одноапертурные (а, в) и многоапертурные (б, г) сканеры ОЛС различных производителей

Рисунок к статье Б. Д. Аминева, С. К. Даниловой «АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМ ПОДВОДНЫМ ОБЪЕКТОМ ПО ЗАДАННОМУ МАРШРУТУ»



Рис. 1. Интерфейс системы полномасштабного имитационного моделирования

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ" выпускает научно-технические журналы



Теоретический и прикладной научно-технический журнал

программная инженерия

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» - 22765; «Пресса России» - 39795







Ежемесячный теоретический и прикладной

научно-технический журнал

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 72656; «Пресса России» – 94033

Научно-практический и учебно-методический журнал БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» - 79963; «Пресса России» - 94032



Ежемесячный междисциплинарный теоретический и прикладной научно-технический журнал

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано- и микросистем в различные области науки, технологии и производства.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 79493; «Пресса России» – 27849

Все журналы распространяются только по подписке.

Оформить подписку можно через подписные агентства либо непосредственно в редакции журналов. Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ" Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10. <u>E-mail: anton</u>ov@novtex.ru