
НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ISSN 1814-1196

№ 3 (60)

2015

УДК 681.51(06)
Н 76

Редакционная коллегия

Главный редактор

Пустовой Николай Васильевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Заместители главного редактора

Вострецов Алексей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Денисов Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Накоряков Владимир Елиферьевич, д-р техн. наук, проф., Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск

Ответственный секретарь

Воевода Александр Александрович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Члены редколлегии

Алаин Бриллиард, д-р, проф., Университет Мюлуза, Франция

Алексеев Сергей Владимирович, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск

Алиферов Александр Иванович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Виротайнен Вели Матти, проф., Технологический университет Лаппеэнранта, Финляндия

Воробьев Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф., СПИИ РАН, г. Санкт-Петербург

Воронин Владимир Викторович, д-р техн. наук, доцент, ТОГУ, г. Хабаровск

Воропай Николай Иванович, д-р техн. наук, проф., Институт систем энергетики им. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск

Воскобойников Юрий Евгеньевич, д-р техн. наук, проф., Сибстрин, г. Новосибирск

Гайдук Анатолий Романович, д-р техн. наук, проф., ЮФУ, г. Таганрог

Григорьев Юрий Дмитриевич, д-р техн. наук, проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург

Загоруйко Андрей Николаевич, д-р техн. наук, проф., Институт катализа СО РАН, г. Новосибирск

Зиновьев Геннадий Степанович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Игуменов Игорь Константинович, д-р хим. наук, проф., Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, г. Новосибирск

Куцый Николай Николаевич, д-р техн. наук, проф., НИУ ИргТУ, г. Иркутск

Луни Серджио, д-р, проф., Падуанский университет, Италия

Мальшиенко Александр Максимович, д-р техн. наук, проф., ТПУ, г. Томск

Мухомад Юрий Федорович, д-р техн. наук, проф., ИргУПС, г. Иркутск

Неизвестный Игорь Георгиевич, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск

Нейман Владимир Юрьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Очирбат Баатар, д-р, проф., Монгольский государственный университет науки и технологии, Монголия

Рубан Анатолий Иванович, д-р техн. наук, проф., СФУ, г. Красноярск

Рылов Анатолий Игоревич, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, г. Новосибирск

Уваров Николай Фавстович, д-р хим. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Фомин Василий Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск

Хабаров Валерий Иванович, д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Хи Жаохуи, Харбинский университет науки и технологии, Китай

Хлебников Михаил Владимирович, д-р физ.-мат. наук, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва

Чичиндаев Александр Васильевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Щетинин Виталий, д-р, проф., Университет Бедфордшир, Великобритания

Адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, VII корп., ком. 409, 417

Тел. (383) 346-56-88, тел. ф. (383) 344-49-98

E-mail: ucit@ucit.ru

Web Site: <http://journals.nstu.ru/vestnik/>

Editorial Address: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

УДК 681.51(06)

© Коллектив авторов, 2015

© Новосибирский государственный
технический университет, 2015

**НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК
НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

ISSN 1814-1196

№ 3 (60)

2015

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ

Воскобойников Ю.Е. Критерий расходимости и алгоритм адаптации рекуррентного алгоритма оценивания вектора состояния	7
Игумнов И.В., Куцкий Н.Н. Нейросетевая реализация и настройка ШИМ-элементов в автоматических системах	23

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Конев А.А., Онищенко А.А., Костюченко Е.Ю., Якимчук А.Ю. Автоматическое распознавание музыкальных нот	32
Новицкий С.П., Печников А.Л. Повышение точности оценок параметров исследуемых объектов импеданс-частотным методом	48
Тимофеев В.С., Фаддеев А.В. Классификация регрессионных моделей на основе объема априорной информации	58
Ханова А.А., Уразалиев Н.С., Усманова З.А. Метод ситуационного управления сложными системами на основе сбалансированной системы показателей	69

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ

Аркашов Н.С., Лежнев Е.В. О модели случайного блуждания на ковре Серпинского ..	83
Горбунов Р.Л., Макаров Д.В. Методика расчета входного фильтра импульсного преобразователя переменного напряжения	94
Дудаев М.А., Пыхалов А.А. Контактная задача в анализе динамического поведения сборных роторов турбомашин	113

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Кучин И.Ю., Иксанов Ш.Ш., Рождественский С.К., Коряков А.Н. Разработка системы позиционирования и контроля объектов с помощью беспроводной технологии Wi-Fi	130
Мотиенко А.И., Ронжин А.Л., Павлюк Н.А. Современные разработки аварийно-спасательных роботов: возможности и принципы их применения	147

Попов Г.А. Формализованная модель развития системы, опирающейся на принцип тяготения к заданным уровням	166
Чубич В.М., Черникова О.С. Особенности задачи планирования эксперимента для гауссовских линейных систем	178

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Крутский Ю.Л., Дюкова К.Д., Баннов А.Г., Максимовский Е.А., Ухина А.В., Крутская Т.М., Нецкина О.В., Кузнецова В.В. Синтез высокодисперсного порошка карбида циркония с использованием нановолокнистого углерода	192
Правила для авторов	206

Корректор *Л.Н. Кинит*
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Журнал зарегистрирован Комитетом РФ по печати. Свидетельство о регистрации
средства массовой информации ПИ № 77–1599 от 10 февраля 2000 г.
Журнал реферирован в ВИНТИ (<http://www.viniti.ru>)
Лицензия ИД 04303 от 20.03.01. Подписано в печать 21.09.2015.
Формат 70 × 108 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экземпляров.
Уч.-изд. л. 18,2. Печатных листов 13,0. Издательский № 190. Заказ № 1453.
Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

SCIENCE BULLETIN OF THE NOVOSIBIRSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

ISSN 1814-1196

№ 3 (60)

2015

УДК 681.51(06)
H 76

Editorial board

Chief editor

Pustovoi N. V., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Deputy chief editor

Vostretsov A. G., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Denisov V. I., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Nakoryakov V. E., D.Sc. (Eng.), Institute of Thermophysics, Novosibirsk, RF

Executive Secretary

Voevoda A. A., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

The members of the editorial Board

Brillard Alain, D.Sc. (Eng.), Universite de Haute Alsace, Mulhouse, France

Alekseenko S. V., D.Sc. (Phys.& Math.), Institute of Thermophysics, Novosibirsk, RF

Aliferov A. I., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Virolainen Veli Matti, professor, Lappeenranta Teknillinen Yliopisto, Finland

Vorob'ev V. I., D.Sc. (Eng.), St. Petersburg Institute for Informatics and automation of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, RF

Voronin V. V., D.Sc. (Eng.), Pacific national University, Khabarovsk, RF

Voropay N. I., D.Sc. (Eng.), Melentiev Energy Systems Institute, Irkutsk, RF

Voskoboinikov Yu E., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, RF

Gaiduk A. R., D.Sc. (Eng.), Southern Federal University, Taganrog, RF

Grigor'ev Iu. D., D.Sc. (Eng.), Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, RF

Zagoruiko A. N., D.Sc. (Eng.), Institute of Catalysis SB RAS, Novosibirsk, RF

Zinoviev G. S., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Igumenov I. K., D.Sc. (Chem.), Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS, Novosibirsk, RF

Kutsyi N. N., D.Sc. (Eng.), National research Irkutsk State Technical University, Irkutsk, RF

Lupi Sergio, D.Sc. (Eng.), Universita degli Studi di Padova, Padua, Italy

Malysenko A. M., D.Sc. (Eng.), National research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, RF

Mukhopad Iu. F., D.Sc. (Eng.), Irkutsk State Transport University, Irkutsk, RF

Neizvestnyi I. G., D.Sc. (Phys.& Math.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Neiman V. Yu., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Ochirbat Baatar, D.Sc. (Eng.), Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia

Ruban A. I., D.Sc. (Eng.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, RF

Rylov A. I., D.Sc. (Phys.& Math.), Sobolev Institute of Mathematics, Novosibirsk, RF

Uvarov N. F., D.Sc. (Chem.), professor, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Fomin V. M., D.Sc. (Phys.& Math.), Khristianovich Institut of theoretical and applied mechanics SB RAS, Novosibirsk, RF

Khabarov V. I., D.Sc. (Eng.), Siberian Transport University, Novosibirsk, RF

Xi Zhaohui, Harbin University of Science and Technology, China

Khlebnikov M. V., D.Sc. (Phys.& Math.), Institute of Control Sciences, Moscow, RF

Chichindaev A. V., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Schetinin V., D.Sc. (Eng.), University of Bedfordshire, Luton, United Kingdom

Editorial Adress: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
e-mail: ucit@ucit.ru

Web Site: <http://journals.nstu.ru/vestnik/>

УДК 681.51(06)

© Authors, 2015

© Novosibirsk State Technical University, 2015

**SCIENCE BULLETIN
OF THE NOVOSIBIRSK STATE
TECHNICAL UNIVERSITY**

ISSN 1814-1196

№ 3 (60)

2015

CONTENTS

AUTOMATIC CONTROL AND REGULATION

Voskoboinikov Yu.E. The divergence criterion and the adaptation algorithm of the recurrent algorithm of the state vector estimation	7
Igumnov I.V., Kucyi N.N. Neural network implementation and adjustment of PWM elements in automatic systems	23

INFORMATION PROCESSING

Konev A.A., Onischenko A.A., Kostyuchenko E.Yu., Yakimuk A.Yu. Automatic recognition of music.....	32
Novitskiy S.P., Pechnikov A.L. Improving an estimation accuracy of research object parameters by the impedance spectroscopy method	48
Timofeev V.S., Faddeenkov A.V. The classification of regression models based on the amount of a priori information	58
Khanova A.A., Urasaliev N.S., Usmanova Z.A. The method of situational control of complex systems based on the balanced scorecard	69

MODELING OF PROCESSES AND DEVICES

Arkashov N.S., Lezhnev E.V. On a model of a random walk on the Sierpinski carpet	83
Gorbunov R.L., Makarov D.V. An input filter design technique for an AC switching converter	94
Dudaev M.A., Pykhalov A.A. The contact problem in the analysis of the dynamic behavior of modular turbomachine rotors	113

MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES

Kuchin I.Yu., Iksanov Sh.Sh., Rozhdestvenskiy S.K., Koryakov A.N. Development of positioning and object control facilities by using Wi-Fi technologies	130
Motienko A.I., Ronzhin A.L., Pavlyuk N.A. Modern developments of rescue robots: possibilities and principles of their application	147

Popov G.A. A formalized model of system development, based on the principle of gravitation to specific levels.....	166
Chubich V.M., Chernikova O.S. Peculiarities of the experiment design problem for Gaussian linear systems	178

CHEMICAL TECHNOLOGY

Krutskii Yu.L., Dyukova K.D., Bannov A.G., Maksimovskii E.A., Ukhina A.V., Krutskaya T.M., Netskina O.V., Kuznetsova V.V. Synthesis of fine zirconium carbide powder with carbon nanofibers.....	192
Rules for authors	206

Editor *L.N. Kinsht*
Computer imposition *S.I. Tkacheva*

The journal is registered by Russian Federation Committee on the press.
The certificate on registration of mass media of PI No. 77-1599 of February 10, 2000.
Journal referenced in VINITI (<http://www.2.viniti.ru>)
License ID 04303 from 20.03.2001. Signed in print 21.09.2015. Format 70 × 108 1/16
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 18,2. printed pages 13,0.
Publishing number 190. Order number 1453.

It is printed in printing house of Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073

УДК 681.51:519.6

Критерий расходимости и алгоритм адаптации рекуррентного алгоритма оценивания вектора состояния*

Ю.Е. ВОСКОБОЙНИКОВ

630008, РФ, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, доктор физико-математических наук, профессор. E-mail: voscob@mail.ru

Рекуррентные алгоритмы оценивания (фильтры Калмана) получили широкое распространение при решении широкого круга задач управления, идентификации и фильтрации. Эти алгоритмы имеют ряд преимуществ перед другими алгоритмами решения названных задач. Главные из этих преимуществ – оптимальность оценки вектора состояния (минимизация среднеквадратической ошибки оценивания) и свойство рекуррентности, когда «новая» оценка вектора состояния получается из «старой» оценки (оценка на предыдущем шаге) и обработки «нового» измерения. Такая схема оценивания получила название «предиктор-корректор». Свойство рекуррентности существенно уменьшает вычислительные затраты на построение оценки вектора состояния и позволяет реализовать (в большинстве случаев) процесс оценивания в реальном масштабе времени. Однако при использовании этих алгоритмов на практике возникает проблема расходимости – когда «истинные» ошибки оценивания вектора состояния существенно выше «расчетных» значений, вычисленных по расчетным соотношениям алгоритма оценивания, т. е. алгоритм оценивания работает не в оптимальном режиме. Для преодоления расходимости алгоритм оценивания должен обнаружить нарушение оптимального режима и провести коррекцию расчетной схемы алгоритма. В работе построен простой и хорошо реализуемый на практике критерий расходимости рекуррентного алгоритма оценивания, который достаточно точно обнаруживает момент потери алгоритмом свойства оптимальности, т. е. момент начала резкого возрастания среднеквадратической ошибки оценивания. В основу этого критерия положена проверка статистических гипотез о свойствах обновляющего процесса, который представляет разность между текущим измерением и предсказанным значением этого измерения. При наступлении такого момента включается предлагаемый алгоритм адаптации, который изменяет ковариационную матрицу ошибки предсказания таким образом, чтобы вернуть алгоритму оценивания свойство оптимальности. Проведенный вычислительный эксперимент показал высокую эффективность построенного критерия и предложенного алгоритма адаптации даже при больших ошибках в задании матриц модели динамической системы.

Ключевые слова: рекуррентный алгоритм оценивания, фильтр Калмана, обновляющий процесс, свойство оптимальности алгоритма оценивания, расходимость алгоритма оценивания, критерий расходимости, ошибка предсказания вектора состояния, статистические свойства ошибки предсказания, алгоритм адаптации, эффективность алгоритма адаптации

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-7-22

* Статья получена 14 мая 2015 г.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 60-х годов прошлого столетия *рекуррентные алгоритмы оценивания* (в литературе также используется второе название – *фильтр Калмана*) получили широкое распространение при решении ряда задач идентификации, оценивания, фильтрации и управления [2, 3, 8, 9, 15]. Эти алгоритмы имеют ряд преимуществ, к основным из которых следует отнести следующие:

1) свойство рекуррентности, когда «новая» оценка вектора состояния получается из «старой» оценки (оценка на предыдущем шаге) и обработки «нового» измерения, такая схема оценивания получила название *предиктор-корректор*. Это существенно уменьшает вычислительные затраты на построение оценки вектора состояния и позволяет реализовать (в большинстве случаев) процесс оценивания в реальном масштабе времени;

2) оптимальность оценки вектора состояния (минимизация среднеквадратической ошибки);

3) вычисление *обновляющей матрицы* алгоритма (другое название – *матрица коэффициентов фильтра Калмана*) не зависит от конкретной реализации случайного вектора измерений. Поэтому для повышения вычислительной эффективности алгоритма можно априори (до начала процедуры оценивания) вычислить все используемые в алгоритме оценивания матрицы, и тогда вычисление «новой» оценки сводится к умножению матрицы на вектор и сложению двух векторов, что минимизирует вычислительные затраты на построение «новой» оценки.

Однако при использовании на практике рекуррентных алгоритмов возникает *проблема расходимости алгоритма оценивания*. Расходимость вызывается неточностями (погрешностями), которые были допущены при построении рекуррентного алгоритма фильтрации. Одними из главных источников таких неточностей являются:

- неточность задания процессов динамики объекта и измерений;
- линеаризация уравнений динамики и измерений;
- упрощающие предположения, позволяющие дать математическое описание задачи;
- неточности в задании вероятностных характеристик шума измерений и (или) возмущения динамики объекта;
- погрешности округления, неизбежно возникающие при вычислениях с матрицами и приводящие к потере положительной определенности ковариационных матриц ошибок оценивания.

Расходимость характеризуется тем, что *истинные* ошибки оценивания вектора состояния могут существенно (на порядок и более) превышать *теоретические* значения, определяемые диагональными элементами вычисленной («теоретической») ковариационной матрицы ошибок оценивания. Расходимость является существенным препятствием для широкого и успешного применения алгоритмов рекуррентного оценивания на практике.

Поэтому в данной работе для предотвращения такой расходимости предлагаются критерий расходимости (определяет момент нарушения оптимального режима оценивания) и алгоритм адаптации процедуры оценивания (коррекция ковариационной матрицы ошибки предсказания вектора состояния для восстановления оптимального режима оценивания).

1. РЕКУРРЕНТНЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ

Необходимым условием применения рекуррентного алгоритма (фильтра Калмана) является возможность описания исследуемой динамической системы (или процесса) в пространстве состояний. При этом описание включает две модели: модель динамики вектора состояний системы и модель измерений вектора состояний. Приведем запись этих моделей в самом общем виде.

Предположим, что модель дискретной системы описывается разностными уравнениями первого порядка вида [2, 3, 4, 10, 11, 15]

$$x(k+1) = \Phi(k+1, k)x(k) + \Gamma(k+1, k)w(k) + \Psi(k+1, k)u(k), \quad (1)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots,$$

где $x(t)$ – t -мерный вектор состояния системы; $w(t)$ – p -мерный вектор возмущения; $u(t)$ – r -мерный вектор управления. Матрицу $\Phi(k+1, k)$ размером $t \times t$ называют переходной матрицей состояния; матрицу $\Gamma(k+1, k)$ размером $t \times p$ – переходной матрицей возмущений; матрицу $\Psi(k+1, k)$ размером $t \times r$ – переходной матрицей управления. Очевидно, что, зная: а) возмущающую последовательность $\{w(0), w(1), \dots\}$; б) управляющую последовательность $\{u(0), u(1), \dots\}$; в) вектор начального состояния $x(0)$, можно вычислить последовательность состояний $\{x(1), x(2), \dots\}$.

Вектор состояния (или часть его проекций) измеряется с помощью определенных датчиков, и этот процесс измерения описывается матричным соотношением

$$z(k+1) = H(k+1)x(k+1) + \eta(k+1), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2)$$

где $z(k+1)$ – n -мерный вектор измерения; $\eta(k+1)$ – n -мерный вектор ошибки измерения (или шум измерения); $H(k+1)$ – матрица размером $n \times t$ – матрица измерений.

Относительно дискретных последовательностей, входящих в (1) и (2), сделаем следующие (не очень обременительные) предположения.

1. Процесс $\{w(i), k = 0, 1, \dots\}$ является p -мерной гауссовской белой последовательностью, для которой

$$M[w(k)] = m_w(k); \quad M[w(j)w^T(k)] = V_w(k)\delta_{jk}, \quad (3)$$

где

$$\delta_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{если } j = k; \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases} \quad (4)$$

Здесь $V_w(k)$ – ковариационная матрица и два вектора $w(j)$ и $w(k)$ не коррелированы, если $j \neq k$ (на это указывает дискретная функция Дирака (4)).

2. Процесс $\eta(k+1)$ представляет собой n -мерную гауссовскую белую последовательность, для которой

$$M[\eta(k+1)] = \bar{0}; \quad M[\eta(j+1)\eta^T(k+1)] = V_\eta(k+1)\delta_{jk}, \quad (5)$$

где $\bar{0}$ – вектор с нулевыми проекциями (нулевой вектор).

3. Для любых j и k

$$M[w(k)\eta^T(j)] \equiv O, \quad (6)$$

где O – нулевая матрица соответствующего размера, т. е. векторы $w(k)$ и $\eta(j)$ не коррелированы.

4. Вектор начального состояния $x(0)$ – это гауссовский m -вектор с

$$M[x(0)] = m_x(0); \quad M[x(0)x^T(0)] = V_x(0), \quad (7)$$

который не зависит от $\{w(k), k=0, 1, \dots\}$ и $\{\eta(k+1), k=0, 1, \dots\}$, т. е.

$$M[x(0)w^T(k)] = O; \quad M[x(0)\eta^T(k+1)] = O \quad (8)$$

для любого $k=0, 1, \dots$

При сделанных предположениях оценка $\hat{x}(k+1)$ рекуррентного алгоритма (фильтра Калмана), которая минимизирует текущую СКО оценивания

$$\Delta(k+1) = M\left[\|\hat{x}(k+1) - x(k+1)\|^2\right], \quad (9)$$

определяется следующими рекуррентными соотношениями [5, 9]:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) = & \Phi(k+1, k)\hat{x}(k) + K(k+1)\{z(k+1) - \\ & - H(k+1)[\Phi(k+1, k)\hat{x}(k) + \Gamma(k+1, k)m_w(k) + \Psi(k+1, k)u(k)]\}, \end{aligned} \quad (10)$$

$k=1, 2, \dots$, и начальным условием $x(0) = m_x(0)$;

$$K(k+1) = V_\varepsilon(k+1)H^T(k+1)V_\eta^{-1}(k+1); \quad k=1, 2, \dots; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} V_\varepsilon(k+1) = & (V_\varepsilon k+1|k) - V_\varepsilon(k+1|k)H^T(k+1) \times \\ & \times \left[H(k+1)V_\varepsilon(k+1|k)H^T(k+1) + V_\eta \right]^{-1} H(k+1)V_\varepsilon(k+1|k); \end{aligned} \quad (12)$$

$$V_\varepsilon(k+1|k) = \Phi(k+1, k)V_\varepsilon(k)\Phi^T(k+1, k) + \Gamma(k+1, k)V_w(k)\Gamma^T(k+1, k), \quad (13)$$

$k=1, 2, \dots$, и начальным условием $V_\varepsilon(0) = V_x(0)$,

где $\hat{x}(k+1|k)$ – предсказания вектора состояния в момент $k+1$ по измерениям до k -го момента включительно, матрица $V_\varepsilon(k+1)$ – ковариационная мат-

рица случайной ошибки оценивания $\varepsilon(k+1) = x(k+1) - \hat{x}(k+1)$, матрица $V_\varepsilon(k+1|k)$ – ковариационная матрица случайной ошибки предсказания $\varepsilon(k+1|k) = x(k+1) - \hat{x}(k+1|k)$.

Приведенные выражения определяют последовательность вычислений матриц рекуррентного алгоритма. Последовательность использования формул следующая: (13), (12), (11):

$$V_\varepsilon(k) \rightarrow V_\varepsilon(k+1|k) \rightarrow V_\varepsilon(k+1) \rightarrow K(k+1). \quad (14)$$

На практике часто встречается случай скалярных измерений, по которым необходимо оценить вектор состояний. Рассмотрим следующую динамическую систему со стационарным вектором измерения x (широко используемую в задачах идентификации стационарных систем) и скалярными измерениями z_{k+1} [4]:

$$x(k+1) = x(k) = x, \quad (15)$$

$$z_{k+1} = h_{k+1}x + \eta_{k+1}, \quad (16)$$

где h_{k+1} – вектор-строка размером $1 \times m$ (аналог матрицы $H(k+1)$ при векторных измерениях); η_{k+1} – случайная скалярная величина – шум измерения. Предположим, что

- вектор состояния x есть гауссовский случайный m -мерный вектор с вектором математического ожидания и корреляционной матрицей

$$m_x = M[x]; \quad V_x = M[(x - m_x)(x - m_x)^T];$$

- шум измерения $\{\eta_{k+1}, k=0, 1, \dots\}$ представляет собой скалярную гауссовскую белую последовательность со следующими числовыми характеристиками:

$$M[\eta_{k+1}] = 0; \quad M[\eta_{k+1}^2] = \sigma_{k+1}^2; \quad M[\eta_j \eta_k] = 0 \text{ при } j \neq k.$$

При сделанных предположениях из уравнений (10)–(13) непосредственно получаем рекуррентный алгоритм *оптимального оценивания стационарного вектора состояния по скалярным измерениям*, описываемый следующими уравнениями:

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) + \frac{V_\varepsilon(k+1)h_{k+1}^T}{\sigma_{k+1}^2} [z_{k+1} - h_{k+1}\hat{x}(k)], \quad (17)$$

$$V_\varepsilon(k+1) = V_\varepsilon(k) - \frac{V_\varepsilon(k)h_{k+1}^T h_{k+1} V_\varepsilon(k)}{\left[h_{k+1} V_\varepsilon(k) h_{k+1}^T + \sigma_{k+1}^2 \right]} \quad (18)$$

для $k=0, 1, 2, \dots$ с точкой «старта» $\hat{x}(0) = m_x, V_\varepsilon(0) = V_x$.

Видно, что алгоритм оценивания стационарного вектора состояния по скалярным наблюдениям включает умножение матрицы на вектор, но не содержит обращения матриц, которое присутствует в алгоритме оценивания общего вида (см. (12)).

Заметим, что алгоритм оценивания нестационарного вектора состояний по скалярным измерениям был приведен в работе [7], где решалась задача оценки градиента в экстремальных системах автоматического регулирования.

Отметим некоторые специфические особенности построенных алгоритмов оценивания:

- текущая оценка $\hat{x}(k+1)$ вектора состояния определяется двумя слагаемыми: вектором предсказания (первое слагаемое в (10), (17)) и вектором коррекции (второе слагаемое в (10), (17)), который зависит от нового вектора измерения $z(k+1)$ (или от скалярного измерения z_{k+1});
- матрица $K(k+1)$ не зависит от измерений $\{z_1, \dots, z_{k+1}\}$, поэтому она может быть вычислена априори, и ее элементы сохранены в памяти компьютера, что позволяет строить оценку $\hat{x}(k+1)$ в реальном масштабе времени;
- вычисление ковариационной матрицы $V_\varepsilon(k+1)$ вектора ошибки оценивания позволяет определить числовые характеристики случайной ошибки оценивания $\xi(k+1) = \varepsilon(k+1) - M[\varepsilon(k+1)]$, что позволяет говорить о точности алгоритма оценивания градиента.

Последние две особенности отчасти обуславливают процесс *расходимости алгоритма оценивания* – истинные ошибки оценивания вектора состояния могут существенно превышать расчетные значения, определяемые диагональными элементами вычисленной («теоретической») ковариационной матрицы $V_\varepsilon(k+1)$ ошибок оценивания. Почему это происходит?

Увеличение ошибки оценивания можно объяснить уменьшением элементов обновляющей матрицы $K(k+1)$ фильтра до маленьких значений (иногда и до нуля), что обуславливает снижение «чувствительности» алгоритма к вновь поступающим измерениям. Такое «расчетное» уменьшение элементов матрицы $K(k+1)$ является «правильным» только при условии, что априорная информация, необходимая для вычисления $K(k+1)$, задана точно. Понятно, что на практике такая ситуация – скорее исключение, чем правило. Например, изменения в «истинной» модели системы матриц $\Phi(k+1, k)$, $\Gamma(k+1, k)$ после завершения переходного процесса алгоритма оценивания могут привести к увеличению значений обновляющего процесса $\tilde{z}(k+1|k) = z(k+1) - \hat{z}(k+1|k)$. Однако это не вызовет изменения оценки $\hat{x}(k+1)$ из-за малой величины «корректора» $K(k+1)\tilde{z}(k+1|k)$. Аналогичный эффект может наблюдаться из-за неточного задания или изменения в процессе работы фильтра вторых моментов случайных процессов $w(k)$, $\eta(k)$.

Таким образом, расходимость обусловлена отличием параметров «истинной» (но неизвестной) модели от параметров «расчетной» модели, по которой вычисляются оценки $\hat{x}(k)$, и выражается в потере «чувствительности» алгоритма к новым измерениям, несущим информацию о поведении «истинной» модели.

Для иллюстрации такой расходимости приведем следующий пример.

Предположим, что «истинная» модель динамической системы описывается следующими скалярными уравнениями:

$$x(k+1) = x(k) + 1 + w(k), \quad (19)$$

$$z(k+1) = x(k+1) + \eta(k+1) \quad (20)$$

со следующими характеристиками:

$$x(0) \sim N(0, V_x), \quad w(k) \sim N(0, V_\omega), \quad \eta(k) \sim N(0, V_\eta).$$

В качестве «расчетной» модели (нижний индекс p в обозначениях) брались соотношения

$$x_p(k+1) = x_p(k) + w(k), \quad (21)$$

$$z_p(k+1) = x_p(k+1) + \eta(k+1), \quad (22)$$

где $x_p(0) \sim N(0, V_x)$. Видно, что в расчетной модели отсутствует слагаемое 1, входящее в выражение (19). Алгоритм оценивания, построенный по уравнениям «истинной модели», описывается соотношениями

$$V_\varepsilon(k+1|k) = V_\varepsilon(k) + V_\omega, \quad K(k+1) = \frac{V_\varepsilon(k+1|k)}{V_\varepsilon(k+1|k) + V_\eta},$$

$$\hat{x}(k+1|k) = \hat{x}(k) + 1, \quad (23)$$

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k+1|k) + K(k+1)[z(k+1) - \hat{x}(k+1|k)],$$

$$V_\varepsilon(k+1) = (I - K(k+1))V_\varepsilon(k+1|k), \text{ где } k=0, 1, \dots; \hat{x}(0) = 0; V_\varepsilon(0) = V_x.$$

Алгоритм оценивания, построенный по уравнениям (21) и (22), отличается от предыдущего только двумя уравнениями:

$$\hat{x}_p(k+1|k) = \hat{x}_p(k), \quad (24)$$

$$\hat{x}_p(k+1) = \hat{x}_p(k+1|k) + K(k+1)[z(k+1) - \hat{x}_p(k+1|k)], \text{ где } \hat{x}_p(0) = 0. \quad (25)$$

На рис. 1 показаны графики значений квадратов ошибок оценивания $\Delta(k) = (\hat{x}(k) - x(k))^2$ – график 1; $\Delta_p(k) = (\hat{x}_p(k) - x(k))^2$ – график 2, соответствующие $V_x = 1.01$; $V_\omega = 0.01$; $V_\eta = 1.0$. Анализ этих графиков указывает на «расходимость» оценки $\hat{x}_p(k)$, которая уже наступает после третьего шага алгоритма оценивания. После этого шага ошибка $\Delta_p(k)$ начинает монотонно возрастать и существенно (на 2-3 порядка) превосходит $\Delta(k)$. Графики 3, 4 будут пояснены позже.

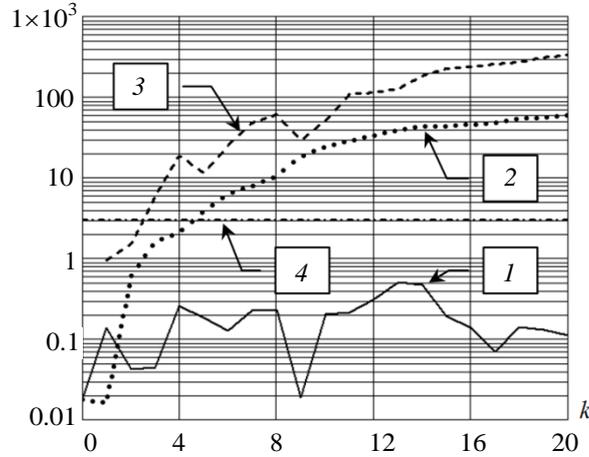


Рис. 1. Расходимость алгоритма оценивания

Возникает вопрос: *можно ли устранить (или хотя бы существенно уменьшить) расходимость алгоритма оценивания?*

Ответ: *расходимость алгоритма в определенной степени можно устранить*, но для этого в рекуррентный алгоритм оценивания необходимо ввести две новые «компоненты»:

- проверку адекватности «истинной» (существующей в реальности) и «расчетной» (используемой при построении алгоритма оценивания) моделей динамической системы с помощью некоторого критерия;
- управление параметрами «расчетной» модели или параметрами алгоритма оценивания для устранения этой неадекватности.

Наличие в рекуррентном алгоритме этих двух новых элементов позволяет говорить об адаптивности алгоритма оценивания.

2. КРИТЕРИЙ РАСХОДИМОСТИ РЕКУРРЕНТНОГО АЛГОРИТМА

Большинство используемых критериев адаптации рекуррентного алгоритма основано на следующем *свойстве оптимальности оценивания* [11]: *если вектор $\hat{x}(k)$ является оптимальной оценкой (т. е. минимизирует функционал (9)), то обновляющая дискретная последовательность*

$$\tilde{z}(k+1|k) = z(k+1) - H(k+1)\hat{x}(k+1|k)$$

является белой гауссовской последовательностью с числовыми характеристиками:

$$m_{\tilde{z}}^{(\text{opt})}(k+1) = M[\tilde{z}(k+1|k)] = \bar{0}; \quad (26)$$

$$V_{\tilde{z}}^{(\text{opt})}(k+1, j+1) = M[\tilde{z}(k+1|k)\tilde{z}^T(j+1|j)] =$$

$$= \begin{cases} H(k+1)V_{\varepsilon}(k+1|k)H^T(k+1)+V_{\eta}(k+1), & \text{если } k=j; \\ O, & \text{если } k \neq j. \end{cases} \quad (27)$$

Верхний индекс «opt» указывает, что эти значения числовых характеристик справедливы только для оптимальной оценки $\hat{x}(k)$. Очевидно, что отклонение «расчетной» модели от «истинной», в свою очередь, вызовет отклонение числовых характеристик «истинной» обновляющей последовательности алгоритма оценивания

$$\tilde{z}(k+1|k) = z(k+1) - H(k+1)\hat{x}(k+1|k) \quad (28)$$

от характеристик $m_{\tilde{z}}(k+1)$, $V_{\tilde{z}}(k+1)$, которые вычисляются по «расчетной» модели системы. Таким образом, проверку адекватности моделей можно свести к проверке гипотез о количественных характеристиках последовательности (28).

В качестве основной гипотезы H_0 принимается предположение, что процесс $\tilde{z}(k+1|k)$ имеет первые два момента, определяемые соотношениями (26) и (27), т. е. алгоритм работает в оптимальном режиме. Заметим, что при вычислении матрицы $V_{\tilde{z}}^{(\text{opt})}(k+1, k+1)$ используются параметры «расчетной» модели, по которой строилась оценка $\hat{x}(k)$. В качестве альтернативной гипотезы H_1 принимается обратное предположение: процесс $\tilde{z}(k+1|k)$ имеет первые два момента, отличные от значений (26) и (27).

Для проверки этих гипотез в качестве критерия примем случайную величину

$$\rho(k+1) = \tilde{z}^T(k+1|k) \left(V_{\tilde{z}}^{(\text{opt})}(k+1, k+1) \right)^{-1} \tilde{z}(k+1|k). \quad (29)$$

Покажем, что если справедлива гипотеза H_0 , то распределение случайной величины $\rho(k+1)$ можно аппроксимировать χ^2 -распределением с n степенями свободы, где n – число проекций вектора измерений. Первоначально вычислим математическое ожидание $M[\rho(k+1)]$. Имеет место очевидное равенство

$$\begin{aligned} M[\rho(k+1)] &= Sp \left[\left(V_{\tilde{z}}^{(\text{opt})}(k+1, k+1) \right)^{-1} M \left[\left(\tilde{z}(k+1|k) \tilde{z}^T(k+1|k) \right) \right] \right] = \\ &= Sp \left[\left(V_{\tilde{z}}^{(\text{opt})}(k+1, k+1) \right)^{-1} V_{\tilde{z}}(k+1, k+1) \right]. \end{aligned}$$

Если выполняется равенство (т. е. рекуррентный алгоритм работает в оптимальном режиме)

$$V_{\tilde{z}}^{(\text{opt})}(k+1, k+1) = V_{\tilde{z}}(k+1, k+1), \quad (30)$$

то

$$M[\rho(k+1)] = n. \quad (31)$$

Кроме этого, при принятии гипотезы H_0 случайная величина $\rho(k+1)$ представляет собой сумму квадратов n случайных величин с единичной дисперсией и нулевым средним. Поэтому проверку нулевой гипотезы можно свести к проверке гипотезы о том, что величина $\rho(k+1)$ имеет χ^2 -распределение с n степенями свободы. Для этого введем интервал

$$\Theta_\beta = [\theta_{\beta/2}, \theta_{1-\beta/2}], \quad (32)$$

где $\theta_{\beta/2}, \theta_{1-\beta/2}$ – квантили χ^2 -распределения с n степенями свободы уровня значимости $\beta/2, 1-\beta/2$ соответственно. Если $\rho(k+1)$ попадает в интервал (32), то с вероятностью ошибки первого рода, равной β , принимается гипотеза H_0 (т. е. алгоритм оценивания работает в оптимальном режиме). Напомним, что ошибкой первого рода при проверке статистических гипотез называется отвержение гипотезы H_0 и принятие гипотезы H_1 , хотя на самом деле гипотеза H_0 справедлива.

В таблице приведены квантили для $n = 1, 2, \dots, 10$ и $\beta = 0.1$.

Квантили χ^2 -распределения

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\theta_{0.05}$	0.039	0.103	0.352	0.711	1.145	1.645	2.167	2.733	3.325
$\theta_{0.95}$	3.800	6.000	7.815	9.488	11.070	12.590	14.06	15.500	16.910

Таким образом, если выполняется неравенство

$$\theta_{\beta/2} \leq \rho(k+1) \leq \theta_{1-\beta/2}, \quad (33)$$

то принимается гипотеза об оптимальном режиме работы рекуррентного алгоритма оценивания.

Заметим, что подход, основанный на проверке статистических гипотез, был предложен автором для выбора параметра регуляризации в устойчивых алгоритмах параметрической идентификации и при решении обратных задач [5, 6].

Вернемся к примеру оценивания вектора состояния динамической системы (19) и (20), когда расчетная модель задавалась уравнениями (21) и (22), т. е. переходная матрица была задана с ошибкой. На рис. 1 график 3 показывает значения критерия $\rho(k)$, а прямая 4 – квантиль $\theta_{0.95} \chi^2$ -распределения с $n=1$ степенями свободы. Видно, что момент нарушения неравенства (33) соответствует резкому возрастанию ошибки оценивания (кривая 2), что говорит о начале процесса расходимости алгоритма оценивания.

Таким образом, проверка адекватности реальной и расчетной моделей свелась к проверке неравенства (33), и поэтому величину (29) можно рас-

считать как критерий расходимости рекуррентного алгоритма оценивания. При невыполнении этого неравенства (т. е. если значение критерия (29) попало в критическую область) можно говорить о существенном (значимом) расхождении между реальной и расчетной моделями, следовательно, необходимо осуществить коррекцию параметров рекуррентного алгоритма.

3. ПРОЦЕДУРА АДАПТАЦИИ АЛГОРИТМА ОЦЕНИВАНИЯ

В публикациях [1, 12, 13, 14] было предложено несколько подходов к построению адаптивных алгоритмов оценивания, в частности на проверке свойства (26) обновляющей последовательности. Однако, получаемые процедуры адаптации были либо сложны для практического применения, либо имели низкую эффективность. Поэтому рассмотрим адаптацию, основанную на коррекции ковариационной матрицы ошибки предсказания.

Обратимся к соотношениям (10)–(13), описывающим работу алгоритма оценивания. Видно, ковариационная матрица ошибки предсказания $V_\varepsilon(k+1|k)$ оказывает влияние и на ковариационную матрицу ошибки оценивания $V_\varepsilon(k+1)$, и на обновляющую матрицу $K(k+1)$. Поэтому адаптацию алгоритма оценивания будем производить коррекцией «расчетной» матрицы $V_\varepsilon(k+1|k)$ в виде

$$V_\varepsilon^{(a)}(k+1|k) = (1 + k_V(k+1)) \left[\Phi(k+1|k) V_\varepsilon(k) \Phi^T(k+1|k) + \Gamma(k+1|k) V_w(k) \Gamma^T(k+1|k) \right]. \quad (34)$$

Матрица $V_\varepsilon^{(a)}(k+1|k)$ – ковариационная матрица ошибки предсказания после процедуры адаптации. Коэффициент $k_V(k+1)$ назовем коэффициентом (параметром) адаптации. Для задания этого коэффициента предлагается использовать следующее соотношение:

$$k_V(k+1) = \begin{cases} 0, & \text{если } \rho(k+1) \leq \theta_{1-\beta/2}; \\ \frac{\max(\rho(k+1), n) - n}{\theta_{1-\beta/2}}, & \text{если } \rho(k+1) > \theta_{1-\beta/2}, \end{cases} \quad (35)$$

где $\theta_{1-\beta/2}$ – квантиль χ^2 -распределения с n степенями свободы уровня значимости $1-\beta/2$.

Работу предложенной процедуры адаптации можно описать следующими этапами.

1. На некотором шаге $k+1$ рекуррентного алгоритма оценивания вычисляется обновляющая последовательность

$$\tilde{z}(k+1|k) = z(k+1) - H(k+1) \hat{x}(k+1|k)$$

и вычисляются значения критерия (29), в котором

$$V_{\tilde{z}}^{(\text{opt})}(k+1, j+1) = H(k+1)V_{\varepsilon}(k+1|k)H^T(k+1) + V_{\eta}(k+1)$$

определяется через расчетные значения матриц.

2. Если выполняется неравенство (33), то алгоритм оценивания работает в оптимальном режиме и идет построение расчетной оценки $\hat{x}(k+1)$, а затем переход к новому шагу и пункту 1. В противном случае – пункт 3.

3. По формуле (35) вычисляется коэффициент адаптации и по формуле (34) – матрица $V_{\varepsilon}^{(a)}(k+1|k)$, которая в дальнейших расчетах выступает в роли новой матрицы $V_{\varepsilon}(k+1|k)$. Переход к пункту 1.

Приведем запись процедуры адаптации рекуррентного алгоритма оценивания (17)–(18) стационарного вектора состояния. Для принятой модели определим

$$\tilde{z}(k+1|k) = z_{k+1} - h_{k+1}\hat{x}(k); \quad V_{\tilde{z}}^{(\text{opt})}(k+1|k) = h_{k+1}V_{\varepsilon}(k)h_{k+1}^T + \sigma_{k+1}^2.$$

Тогда критерий (29) можно записать в виде

$$\rho(k+1) = \frac{(z_{k+1} - h_{k+1}\hat{x}(k))^2}{h_{k+1}V_{\varepsilon}(k)h_{k+1}^T + \sigma_{k+1}^2}. \quad (36)$$

Из этого выражения видно, что величину $\rho(k)$ можно уменьшить путем увеличения $V_{\varepsilon}(k)$, что эквивалентно увеличению вектора $K(k+1)$ (см. выражение (17)). Увеличение $V_{\varepsilon}(k)$ можно достигнуть умножением этой матрицы на скалярную величину $c_V(k)$. Тогда адаптивный алгоритм рекуррентного оценивания можно записать в виде

$$\hat{x}_a(k+1) = \hat{x}_a(k) + \frac{c_V(k)V_{\varepsilon}(k)h_{k+1}^T}{c_V(k)h_{k+1}V_{\varepsilon}(k)h_{k+1}^T + \sigma_{k+1}^2} [z_{k+1} - h_{k+1}\hat{x}_a(k)]; \quad (37)$$

$$V_{\varepsilon}(k+1) = c_V(k)V_{\varepsilon}(k) - \frac{c_V^2(k)V_{\varepsilon}(k)h_{k+1}^T h_{k+1}V_{\varepsilon}(k)}{c_V(k)h_{k+1}V_{\varepsilon}(k)h_{k+1}^T + \sigma_{k+1}^2}, \quad (38)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, \quad x_a(0) = m_x; \quad V_{\varepsilon}(0) = V_x.$$

Для выбора множителя $c_V(k)$ предлагается следующее соотношение:

$$c_V(k) = \begin{cases} 1, & \text{если } \rho(k) \leq 3.8; \\ \frac{\rho(k)}{3.8}, & \text{если } \rho(k) > 3.8. \end{cases} \quad (39)$$

Константа 3.8 является квантилем $\theta_{0.95} \chi^2$ -распределения с числом степеней свободы 1 (см. таблицу).

Для иллюстрации работоспособности предложенных алгоритмов адаптации вернемся к примеру оценивания вектора состояния системы (19) и (20) при неправильной расчетной модели (21), (22). Для этой системы использовался частный случай коррекции (34), где коэффициент $k_V(k+1)$ определялся выражением (35). На рис. 2 график 1 – значения ошибки оценивания $\Delta(k) = (\hat{x}(k) - x(k))^2$ для «истинной» модели; кривая 2 – величина $\Delta_a(k) = (\hat{x}_a(k) - x(k))^2$ ошибки оценивания адаптивным алгоритмом; кривая 3 – значения статистики $\rho_a(k)$ для адаптивного алгоритма. Видно следующее:

- все значения $\rho_a(k)$ находятся ниже граничного значения $\theta_{0.95}$ – штриховая линия на рис. 2;
- оценка адаптивного фильтра $\hat{x}_a(k)$ имеет существенно более высокую точность по сравнению с фильтром, построенным по неточной модели системы (см. рис. 1).

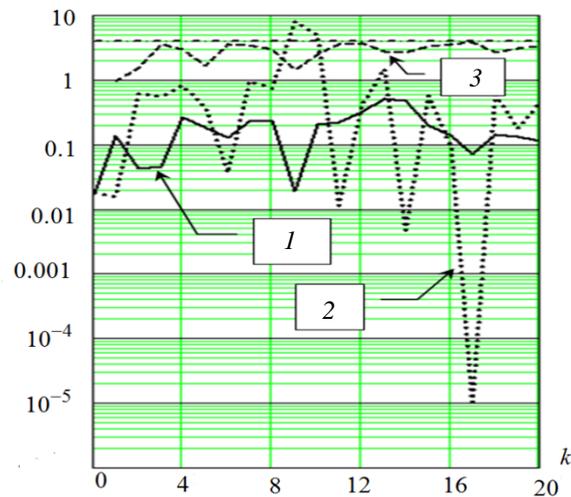


Рис. 2. Адаптация алгоритма оценивания

Результаты как этого вычислительного эксперимента, так и других, выполненных с разными моделями динамических систем, позволяют говорить об эффективности предложенного подхода к построению адаптивных алгоритмов оценивания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный критерий позволяет достаточно точно оценить момент начала расходимости рекуррентного алгоритма оценивания вектора состояния динамических систем. Он не требует никакой априорной информации об оцениваемом векторе состояния. Для предотвращения расходимости предложена процедура адаптации, которая состоит в коррекции ковариационной матрицы ошибки предсказания, что позволяет поддерживать оптимальный режим работы алгоритма оценивания даже при больших ошибках задания как переходной матрицы системы, так и других матриц, входящих в модель системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коуэн К.Ф., Грант П.М. Адаптивные фильтры: пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 392 с.
2. Балакришнан А.В. Теория фильтрации Калмана. – М.: Наука, 1984. – 186 с.
3. Браммер Л., Зифлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси. – М.: Наука, 1982. – 199 с.
4. Воскобойников Ю.Е. Рекуррентное оценивание вектора состояния динамических систем. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 136 с.
5. Воскобойников Ю.Е. Устойчивые методы и алгоритмы параметрической идентификации: научная монография. – Новосибирск: Изд-во НГАСУ (Сибстрин), 2006. – 168 с.
6. Воскобойников Ю.Е. Устойчивые алгоритмы решения обратных задач: научная монография. – Новосибирск: Изд-во НГАСУ (Сибстрин), 2007. – 188 с.
7. Воскобойников Ю.Е., Ханин А.Г. Рекуррентный алгоритм оценивания градиента в системах экстремального регулирования // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 1 (46). – С. 3–9.
8. Карелин А.Е. Синтез, исследование и применение рекуррентных алгоритмов оценивания параметров математических моделей объектов в автоматизированных системах управления: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2007. – 18 с.
9. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: пер. с англ. / под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
10. Медич Дж. Статистические оптимальные линейные оценки и управление. – М.: Энергия, 1973. – 340 с.
11. Фомин В.Н. Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
12. Doblinger G. An adaptive Kalman filter for the enhancement of noisy AR signals // Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS'98, 31 May – 3 June 1998. – Monterey, California: IEEE, 1998. – Vol. 5. – P. 305–308. – doi: 10.1109/ISCAS.1998.694474.
13. Naykin S. Adaptive filter theory. Chap. 9. – New York: Prentice-Hall, 1987. – 323 p.
14. Adaptive filtering of color noise using the Kalman filter algorithm / S. Xiong, Z. Zhou, L. Zhong, C. Xu, W. Zhang // Proceedings of the 17th Instrumentation and Measurement Technology Conference, Baltimore, Maryland, USA, 1–4 May 2000. – Piscataway, New Jersey: IEEE Service Center, 2000. – Vol. 2. – P. 1009–1012.
15. Spall J.C. Introduction to Stochastic Search and Optimization: Estimation, Simulation, and Control. – Hoboken, New Jersey: Wiley, 2003. – 618 p.

Воскобойников Юрий Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики НГАСУ (Сибстрин), профессор кафедры автоматики НГТУ, заслуженный работник Высшей школы РФ. Основное направление научных исследований – решение некорректных задач интерпретации данных, задачи вычислительной томографии, идентификация динамических систем, фильтрация сигналов и изображений. Имеет более 290 научных публикаций, 6 монографий, 16 учебников и учебных пособий. E-mail: voscob@mail.ru

The divergence criterion and the adaptation algorithm of the recurrent algorithm of the state vector estimation*

Yu.E. VOSKOBOINIKOV

Novosibirsk State Architecture and Building University, 113, Leningradskaya St., Novosibirsk, 630008, Russia, D.Sc. (Phys. & Math.), professor. E-mail: voscob@mail.ru

Recurrent estimation algorithms (Kalman filter) is widespread in solving a wide range of problems of control, identification and filtering. These algorithms have several advantages over other algorithms for solving these problems. The main of these advantages is an optimal estimate of the state vector (minimization of the mean square error of estimation) and the recur-

* Received 14 May 2015.

rence property when a "new" estimate of the state vector is obtained from an "old" estimate (evaluation at the previous step) and processing a "new" measurement. This scheme has received the predictor-corrector name. The recurrence property significantly reduces the computational cost to build estimates of the state vector and (in most cases) allows implementing the estimation process in real-time. However, when these algorithms are used in practice, the problem of divergence arises when the "true" error of estimation of the state vector is significantly higher than the "design" values calculated through the estimated correlations of the estimation algorithm, i.e. the estimation algorithm does not work optimally. To overcome the divergence, the estimation algorithm must detect the violation of the optimal mode and to correct the computational scheme of the algorithm. In this paper we construct a simple divergence criterion of the recurrent algorithm estimation well implemented in practice, which accurately detects the time when the algorithm loses the optimality property, i.e. the beginning of a sharp increase in the root mean square error of estimation. This criterion is based on testing statistical hypotheses of properties of the updating process that represents the difference between the current measurement and the predicted value of this measurement. When such a moment occurs, the proposed adaptation algorithm which modifies the variance-covariance matrix of the prediction error intervenes so as to give back the optimality property to the estimation algorithm. The implementation of the computing experiment showed a high efficiency of the constructed criterion and the proposed adaptation algorithm, even with large errors in the matrix model of the dynamic system.

Keywords: recursive estimation algorithm, the Kalman filter, updating process, the optimality property of the estimation algorithm, the divergence of the estimation algorithm, the criterion of divergence, prediction error of the state vector, statistical properties of the prediction error, adaptation algorithm, efficiency of the adaptation algorithm

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-7-22

REFERENCES

1. Covan C.F., Grant P.M. *Adaptive filter*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 1985. 382 p. (Russ. ed.: Kouen K.F., Grant P.M. *Adaptivnye fil'try*. Moscow, Mir Publ., 1988. 392 p.).
2. Balakrishnan A.V. *Kalman filtering theory*. New York, Optimization software, 1982. 182 p. (Russ. ed.: Balakrishnan A.V. *Teoriya fil'tratsii Kalmana*. Moscow, Nauka Publ., 1984. 186 p.).
3. Brammer K., Siffing G. *Kalman-Busi filter*. New York, Artech House Publishers, 1985. 202 p. (Russ. ed.: Brammer L., Zifling G. *Fil'tr Kalmana-B'yusi*. Moscow, Nauka Publ., 1982. 199 p.).
4. Voskoboinikov Yu.E. Rekurrentnoe otsenivanie vektora sostoyaniya dinamicheskikh sistem [Recurrent estimation of state vector of dynamic systems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2014. 136 p.
5. Voskoboinikov Yu.E. *Ustoichivye metody i algoritmy parametricheskoi identifikatsii* [The stable methods and algorithms for parametric identification]. Novosibirsk, NGASU (Sibstrin) Publ., 2006. 168 p.
6. Voskoboinikov Yu.E. *Ustoichivye algoritmy resheniya obratnykh zadach* [The stable algorithms for solving inverse problems]. Novosibirsk, NGASU (Sibstrin) Publ., 2007. 188 p.
7. Voskoboinikov Yu.E., Khanin A.G. Rekurrentnyi algoritm otsenivaniya gradienta v sistemakh ekstremal'nogo regulirovaniya [Recursive algorithm for gradient estimating in the systems extreme control]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2012, no. 1 (46), pp. 3–9.
8. Karelin A.E. *Sintez, issledovanie i primeneniye rekurrentnykh algoritmov otsenivaniya parametrov matematicheskikh modelei ob'ektov v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Synthesis, study and application of recursive algorithms for estimating the parameters of mathematical models of objects in automated control systems. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Tomsk, 2007. 18 p.
9. Ljung L. *System identification – theory for the user*. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 1988. 446 p. (Russ. ed.: L'yung L. *Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya*. Translated from English. Moscow, Nauka Publ., 1991. 432 p.).

10. Meditch J.S. *Stochastic optimal linear estimation and control*. New York, Mc. Graw Hill, 1969. 425 p. (Russ. ed.: Medich Dzh. *Statisticheskie optimal'nye lineinye otsenki i upravlenie*. Moscow, Energiya Publ., 1973. 340 p.).
11. Fomin V.N. *Rekurrentnoe otsenivanie i adaptivnaya fil'tratsiya* [Recurrent estimation and adaptive filtration]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 288 p.
12. Doblinger G. An adaptive Kalman filter for the enhancement of noisy AR signals. *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS'98*, Monterey, California, 31 May – 3 June 1998, vol. 5, pp. 305–308. doi: 10.1109/ISCAS.1998.694474
13. Naykin S. *Adaptive filter theory*. Chap. 9. New York, Prentice-Hall, 1987. 323 p.
14. Xiong S., Zhou Z., Zhong L., Xu C., Zhang W. Adaptive filtering of color noise using the Kalman filter algorithm. *Proceedings of the 17th Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC 2000*, Baltimore, Maryland, USA, 1–4 May, 2000, vol. 2, pp. 1009–1012. doi: 10.1109/IMTC.2000.848893
15. Spall J.C. *Introduction to stochastic search and optimization: estimation, simulation, and control*. Hoboken, New Jersey, Wiley, 2003. 618 p.

УДК 004.85:681.51.01

Нейросетевая реализация и настройка ШИМ-элементов в автоматических системах*

И.В. ИГУМНОВ¹, Н.Н. КУЦЫЙ²

¹ 664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, аспирант кафедры «Автоматизированные системы». E-mail: rtif555@gmail.com

² 664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные системы». E-mail: kucyinn@mail.ru

Рассмотрена задача обучения нейронной сети (ОНС) применительно к дискретным автоматическим системам регулирования, содержащим звенья с ШИМ-элементом, имеющим в своем составе искусственную нейронную сеть.

Как известно, системы с ШИМ относятся к существенно нелинейным, и тем самым решение задачи параметрической оптимизации, т. е. вычисление оптимальных исходя из принятого критерия значений настраиваемых параметров, наталкивается на значительные трудности.

Алгоритмические методы оптимизации позволяют уменьшить эти трудности, но они требуют приложения специального математического аппарата и тем самым специалистов достаточно высокого уровня.

Требования достаточно высокой степени полноты априорных знаний об условиях функционирования автоматических систем при применении алгоритмических методов можно снизить за счет нечеткого управления, которое в последнее время формируется на основе нейронных сетей.

В данной работе решена задача параметрической оптимизации автоматической системы с ШИМ с помощью алгоритма ОНС, сформированного на основе метода Нелдера-Мида.

Представлены структурная схема исследуемой автоматической системы и ее математическое описание. Показана архитектура нейронной сети, определяющая скважность выходных импульсов ШИМ-элемента.

Достаточно подробно описаны те особенности метода Нелдера-Мида, которые определяют реализацию алгоритма решения задачи параметрической оптимизации рассмотренной автоматической системы, при этом особое внимание уделено построению начальных симплексов и способу уменьшения числа, что в значительной мере определяет успешность применения такого алгоритма.

Представлена блок-схема этого алгоритма, позволяющая перейти к его реализации с последующими исследованиями, цель которых – выдача конкретных рекомендаций при создании программного модуля «Оптимизация» для конкретных промышленных автоматических систем.

*Статья получена 27 апреля 2015 г.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, широтно-импульсная модуляция, параметрическая оптимизация, обучение нейронной сети, метод Нелдера-Мида, модуляционная характеристика, интегральный критерий качества, блок-схема

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-23-31

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в практике автоматического регулирования распространены системы с широтно-импульсной модуляцией с их известными преимуществами [1]. Но так как такие системы относятся к существенно нелинейным, то тем самым решение задачи параметрической оптимизации, т. е. вычисление оптимальных исходя из принятого критерия значений настраиваемых параметров, наталкивается на значительные трудности. Последнее заставляет обращаться к различного рода упрощениям, к приближенным методам, что в конечном итоге сводит на нет преимущества автоматических систем с ШИМ.

Сохранить преимущества таких автоматических систем при решении задачи параметрической оптимизации позволяют алгоритмические методы, но, с одной стороны, они требуют приложения специального математического аппарата, выходящего за рамки традиционного курса математики технических вузов, а с другой стороны, при формировании и реализации соответствующего программного обеспечения необходимы специалисты как достаточно высокой квалификации, так и различных направлений.

Применение алгоритмических методов требует достаточно высокой степени полноты априорных знаний об условиях функционирования автоматической системы, а в большинстве случаев из-за невозможности обеспечить эту высокую степень приходится прибегать к методам нечеткого управления [2]. В последнее время применение этих методов значительно расширилось за счет использования нейронных сетей [3–8].

В настоящей работе рассматривается задача параметрической оптимизации автоматической системы, в которой ШИМ-элемент реализован на основе искусственной нейронной сети (ИНС). Указанная задача решается за счет обучения нейронной сети (ОНС) с помощью алгоритма, сформированного на базе метода Нелдера-Мида с его известными преимуществами [9–11].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Структурная схема исследуемой автоматической системы представлена на рис. 1.

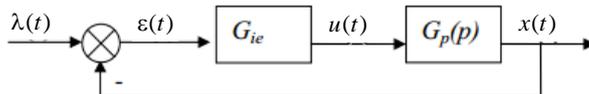


Рис. 1. Структурная схема автоматической системы

Здесь $G_p(p)$ – оператор объекта регулирования; $u(t)$ – выход ШИМ-элемента; G_{ie} – оператор ШИМ-элемента с нейронной сетью; $p = d/dt$ – оператор дифференцирования; $\lambda(t)$ – задающее воздействие; $x(t)$ – регулируемая величина; $\varepsilon(t)$ – ошибка регулирования.

Процессы, протекающие в автоматической системе регулирования (АСР), можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \lambda(t) - x(t), \\ u(t) &= G_{ie}\varepsilon(t), \\ x(t) &= G_p(p)u(t). \end{aligned} \tag{1}$$

Оператор объекта регулирования $G_p(p)$ в настоящей работе представлен в символическом виде [12] и описывает значительное количество промышленных объектов:

$$G_p(p) = \frac{k_{и.м}}{p} \frac{k_{об}}{(T_{об1}p + 1)(T_{об2}p + 1)} e^{-\tau_{об}p}, \tag{2}$$

где $k_{об}$ – коэффициент передачи объекта, $k_{и.м}$ – коэффициент передачи исполнительного механизма; $T_{об1}$, $T_{об2}$ – постоянные времени объекта, $\tau_{об}$ – время запаздывания.

Характеристика ШИМ-элемента представлена в виде

$$u(t) = \begin{cases} +1 & \text{при } \varepsilon[kT] > 0 \text{ и при } kT \leq t < kT + t_k, \\ -1 & \text{при } \varepsilon[kT] < 0 \text{ и при } kT \leq t < kT + t_k, \\ 0 & \text{при } kT + t_k \leq (k+1)T, \end{cases} \tag{3}$$

$$t_k = \gamma_k T, \tag{4}$$

$$k = 1, 2, \dots,$$

где T – период цикла работы ШИМ-элемента; t_k – длительность (ширина) k -го импульса; λ_k – скважность k -го импульса, которая находится с помощью нейронной сети [13], изображенной на рис. 2.

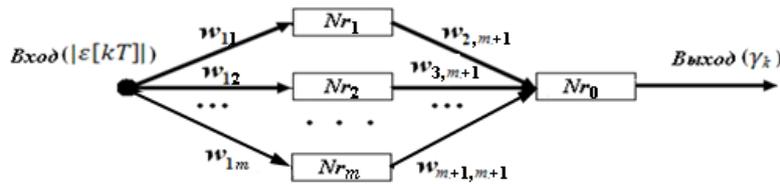


Рис. 2. Архитектура нейронной сети

Здесь Nr_i – нейроны скрытого слоя ($i = 1, \dots, m$), $w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1m}, w_{2,m+1}, w_{3,m+1}, \dots, w_{m+1,m+1}$ – весовые коэффициенты, образующие матрицу весовых коэффициентов \mathbf{W} . Данная ИНС сформирована на основе модуляционной характеристики вида [14, 15]

$$\gamma_k = q_1 |\varepsilon[kT]|^1 + q_2 |\varepsilon[kT]|^2 + q_3 |\varepsilon[kT]|^3 + \dots + q_m |\varepsilon[kT]|^m = \sum_{j=1}^m q_j |\varepsilon[kT]|^j. \tag{5}$$

В качестве оценки работы автоматической системы принят интегральный критерий вида:

$$I(\mathbf{W}) = \int_0^{\infty} F(x(t, \mathbf{W}), \varepsilon(t, \mathbf{W})) dt. \quad (6)$$

Здесь $x(t, \mathbf{W})$ – выходная координата системы, $\varepsilon(t, \mathbf{W})$ – ошибка системы, F – некоторая выпуклая функция.

2. ФОРМИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

На основе метода Нелдера-Мида разработан алгоритм, позволяющий решать задачу, указанную выше. Исходя из специфики данной задачи представим достаточно подробно те моменты, которые требуют дальнейшего рассмотрения.

Во-первых, формируется набор начальных симплексов, у которых координаты n ($n = 2m$) точек (в нашем случае значения весовых коэффициентов) подобраны таким образом, чтобы выход нейронной сети отражал реакцию на значения от отдельного синаптического веса w_{lk} ($w_{k+1, m+1}$), тогда исходя из архитектуры нейронной сети (рис. 2) $w_{k+1, m+1}$ (w_{lk}) = 1, а остальные веса $w_{ij} = 0$, где при $i = 1$ $j = 1, 2, \dots, k-1, k+1, \dots, m$ и при $j = m+1$ $i = 2, \dots, k, k+2, \dots, m$. Исходя из [10] в $n+1$ точке значения всех синаптических весов принимаются равными нулю. Также в точках симплекса используется варьирование знака синаптических весов всего множества их возможных значений и, как результат предварительных исследований, конкретизированы в виде $\pm 1, \pm 10, \pm 100, \pm 1000$. Таким образом, при $n = 4$ для одного значения будем иметь 16 начальных симплексов (размещение с повторением двух элементов по четырем позициям), а при использовании всех значений – 64 начальных симплекса.

Такое количество начальных симплексов определяет соответствующий объем исследований. С целью его уменьшения для всех начальных симплексов выполняются следующие операции. В каждом симплексе для всех точек вычисляется значение критерия (6), в данном случае обозначается как I_{ij} , где $i = 1, 2, \dots$ – номер симплекса, $j = 1, 2, \dots$ – точка i -го симплекса. Затем определяется \hat{I} – характеристическое число симплекса как $\hat{I} = \min(I_{ij})$. Далее

рассматриваются только те симплексы, для которых $\frac{\hat{I}}{\min(\hat{I})} \leq \mu$ (где μ –

произвольное натуральное число > 1).

Затем с отобранными симплексами выполняются следующие операции.

1. Сортировка – из вершин симплекса (векторов значений весовых коэффициентов z) выбираются три точки: z_h с наибольшим (из выбранных) значением критерия I , точка z_g со следующим по величине значением критерия и точка z_l с наименьшим значением критерия (h, g, l – индексы точек z_h, z_g и z_l в вершинах симплекса).

2. Отражение – проектирование z_h через центр тяжести в соответствии с соотношением

$$z_r = (1 + \alpha)z_c - \alpha z_h, \quad (7)$$

где $\alpha > 0$ является коэффициентом отражения; z_r – точка отражения; z_c – центр тяжести, вычисляемый по формуле $z_c = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{z_i}{n+1}, i \neq h$.

3. Растяжение. Если $I(z_r) < I(z_l)$, то направление отражения признается удачным и делается попытка растянуть симплекс в этом направлении.

$$z_e = (1 - d)z_c - dz_r, \quad (8)$$

где $d > 1$ представляет собой коэффициент растяжения; z_e – точка растяжения. Если $I(z_e) < I(z_l)$, то z_h заменяется на z_e , проходит проверка на критерий окончания поиска и в случае неуспеха процедура продолжается с новой итерации с операции «сортировка». В противном случае z_h заменяется на z_r и также проходит проверка на критерий окончания поиска (12), и в случае неуспеха продолжается с операции «сортировка».

4. Сжатие. Если $I(z_g) < I(z_r)$, то считается, что симплекс слишком велик и его надо сжать. Сжатие может быть внутренним и внешним.

Внешнее сжатие. Если $I(z_r) < I(z_h)$, то вычисляется

$$z_s = z_c + \beta(z_r - z_c), \quad (9)$$

где $\beta < 1$ представляет собой коэффициент сжатия; z_s – точка сжатия. Если $I(z_s) < I(z_l)$, добавляем точку z_s в множество точек симплекса вместо z_h и заканчиваем итерацию (проверяем условие сходимости (12)), иначе проводим операцию усечения, о которой сказано ниже.

Внутреннее сжатие. Если $I(z_h) < I(z_r)$, вычисляется

$$z_s = \beta z_h + (1 - \beta)z_c. \quad (10)$$

Затем поступаем аналогичным образом, что и при внешнем сжатии.

5. Усечение (редукция). Вычисляется новый симплекс:

$$z_i = z_l + \frac{(z_i - z_l)}{2}, \quad i = 1..n+1, \quad i \neq l. \quad (11)$$

Критерий окончания поиска (условие сходимости) [10], примененный в данной работе, с учетом конкретики решаемой задачи определяется выражением

$$\left\{ \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} \left[I(\mathbf{w}_i^{(k)}) - I(\mathbf{w}_c^{(k)}) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \leq \bar{\varepsilon}, \quad (12)$$

где $\bar{\varepsilon}$ – произвольное малое число, $I(\mathbf{W}_c^{\bar{k}})$ – значение целевой функции в центре тяжести симплекса, $\bar{k} = (1, 2, 3, \dots)$ – номер итерации (рис. 3).

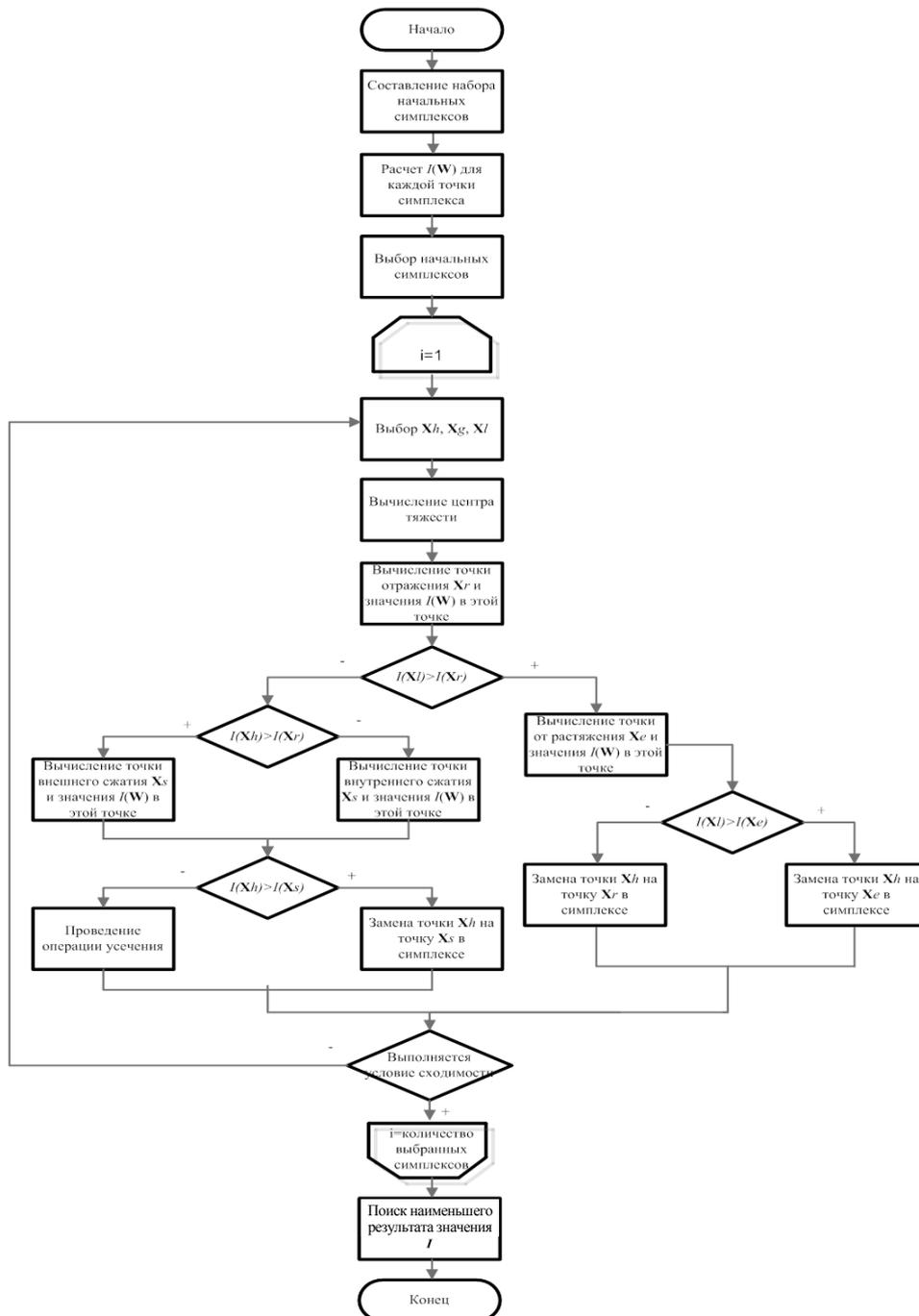


Рис. 3. Блок-схема алгоритма

После выполнения критерия окончания поиска из двух точек, z_l и z_c , выбирается точка с наименьшим значением критерия I , которая и будет считаться решением (экстремумом) по данному симплексу.

Затем происходит сравнение результатов работы алгоритма по каждому симплексу. Путем нахождения расстояния между этими точками формируется набор локальных экстремумов. Среди этого набора выбирается точка с наименьшим значением критерия I , и ее значения синаптических весов и считаются оптимальными.

ВЫВОДЫ

Рассмотрена нейросетевая реализация ШИМ-элемента в автоматической системе, для которой выполнена постановка задачи параметрической оптимизации относительно интегрального критерия качества. Показано применение метода Нелдера-Мида, на основе которого выполнено формирование алгоритма решения поставленной задачи параметрической оптимизации. Представленная блок-схема этого алгоритма позволяет перейти к его реализации с последующими исследованиями, цель которых – выдача конкретных рекомендаций при создании программного модуля «Оптимизация» для конкретных промышленных автоматических систем

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юлиус Ю.Т. Цифровые и импульсные системы автоматического управления: пер. с англ. О.Д. Богомоллова, Ю.И. Бородина. – М.: Машиностроение, 1964. – 698 с.
2. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление: пер. с англ. А.Г. Подвесовского, Ю.В. Тюменцева; под ред. Ю.В. Тюменцева. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 798 с.
3. Усков А.А., Кузьмин А.В. Интеллектуальные технологии управления: искусственные нейронные сети и нечеткая логика. – М.: Горячая линия–Телеком, 2004. – 143 с.
4. Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Ретин А.И. Автоматические системы регулирования на основе нейросетевых технологий // Вестник Московского энергетического института. – 2005. – № 3. – С. 10–18.
5. Шаровин И.М., Смирнов Н.И., Ретин А.И. Применение искусственных нейронных сетей для адаптации САР в процессе их эксплуатации // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2012. – № 4. – С. 27–32.
6. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления. – М.: ИПРЖР, 2002. – 480 с.
7. Локтюхин В.Н., Челебаев С.В., Антоненко А.В. Нейросетевые аналого-цифровые преобразователи / под общ. ред. А.И. Галушкина. – М.: Горячая линия-Телеком, 2010. – 128 с.
8. Заенцев И.В. Нейронные сети: основные модели: учебное пособие к курсу «Нейронные сети» для студентов 5 курса магистратуры. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1999. – 76 с.
9. Ловецкий К.П., Севастьянов Л.А., Бикеев О.Н. Математический синтез оптических наноструктур. – М.: РУДН, 2008. – 143 с.
10. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 536 с.
11. Рыков А.С. Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации. – М.: МИСиС, 2009. – 608 с.
12. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – СПб: Профессия, 2003. – 752 с.
13. Игумнов И.В., Куцый Н.Н. Формирование ШИМ-элемента с использованием искусственных нейронных сетей // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 6 (89). – С. 31–35.

14. Куцый Н.Н. Автоматическая параметрическая оптимизация дискретных систем регулирования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06. – М., 1997. – 386 с.

15. Слепов Н.Н., Дроздов Б.В. Широотно-импульсная модуляция: (анализ и применение в магнитной записи). – М.: Энергия, 1978. – 191 с.

Игумнов Иннокентий Васильевич, аспирант кафедры «Автоматизированные системы» Иркутского национального исследовательского технического университета. Основные направления научных исследований: автоматизация технологических процессов и производств, нейронные сети. Имеет одну публикацию. E-mail: rtif555@gmail.com

Куцый Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные системы» Иркутского национального исследовательского технического университета. Основные направления научных исследований: автоматизация технологических процессов и производств, теория обратных матриц. Имеет более 200 публикаций. E-mail: kucyinn@mail.ru

Neural network implementation and adjustment of PWM elements in automatic systems*

I. IGUMNOV¹, N. KUCYI²

¹*Irkutsk State Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation, graduate student. E-mail: rtif555@gmail.com*

²*Irkutsk State Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation, PhD (Eng.), professor. E-mail: kucyinn@mail.ru*

The problem of neural network learning (NNL) is considered in relation to discrete automatic control systems containing PWM element links having an artificial neural network in their structure.

PWM systems are essentially nonlinear, and thus the solution of the parametric optimization problem, i.e. calculation of values of adjustable parameters based on an accepted criterion is quite difficult.

Algorithmic optimization methods can reduce these difficulties but they require the application of a special mathematical apparatus and thus experienced professionals.

Requirements of sufficiently high completeness of a priori knowledge about the conditions of automatic system operation in using algorithmic methods can be reduced by fuzzy control that has recently been formed on the basis of neural networks.

We present the solution to the problem of parametric optimization of the system with automatic PWM using the NNL algorithm formed on the basis of the Nelder-Mead method.

The structural diagram of the studied systems and its mathematical description are presented in the paper. The architecture of a neural network that determines the duty cycle of the PWM output element is shown.

The features of the Nelder-Mead method that determine the implementation of the algorithm for solving the problem of parametric optimization of a given automatic system are described in detail, with particular attention being paid to the construction of initial simplexes and reducing the number, which largely determines the success of this algorithm application.

A block diagram of the algorithm which makes possible its implementation with subsequent studies aimed at giving detailed recommendations when creating the Optimization program module for specific industrial automation systems.

Keywords: artificial neural network, pulse width modulation, parameter optimization, neural network training, Nelder-Mead method, modulation characteristic, integral quality criterion, block diagram

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-23-31

* Received 27 April 2015.

REFERENCES

1. Julius T. *Digital and sampled-data control system*. London, McGraw-Hill Book Company, 1950. 698 p. (Russ. ed.: Julius Yu.T. *Tsifrovyye i impul'snyye sistemy avtomaticheskogo upravleniya*. Translated from English O.D. Bogomolov, Yu.I. Borodin. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964. 698 p.).
2. Pegat A. *Fuzzy modeling and control*. Heidelberg, Physica-Verlag, 2001. 798 p. (Russ. ed.: Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie*. Translated from English A.G. Podvesovskii, Yu.V. Tyumentsev. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2013. 798 p.).
3. Uskov A.A., Kuz'min A.V. *Intellektual'nye tekhnologii upravleniya: iskusstvennyye neironnyye seti i nechetkaya logika* [Intelligent control technology: artificial neural networks and fuzzy logic]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2004. 143 p.
4. Sabanin V.R., Smirnov N.I., Repin A.I. Avtomaticheskie sistemy regulirovaniya na osnove neirosetevykh tekhnologii [The automatic control system based on neural network technology]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta – Bulletin of the Moscow Energy Institute*, 2005, no. 3, pp. 10–18.
5. Sharovin I.M., Smirnov N.I., Repin A.I. Primenenie iskusstvennykh neironnykh setei dlya adaptatsii SAR v protsesse ikh ekspluatatsii [The use of artificial neural networks to adapt the CAP in the process of operation]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery – Industrial ACS and controllers*, 2012, no. 4, pp. 27–32.
6. Terekhov V.A., Efimov D.V., Tyukin I.Yu. *Neirosetevyye sistemy upravleniya* [Neural network management system]. Moscow, IPRZHR Publ., 2002. 480 p.
7. Loktyukhin V.N., Chelebaev S.V., Antonenko A.V. *Neirosetevyye analogo-tsifrovyye pre-obrazovateli* [Neural analogue-digital transformation, the adjustable]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2010. 128 p.
8. Zaentsev I.V. *Neironnyye seti: osnovnyye modeli* [Neural networks are basic models]. Voronezh, Voronezh State University Publ., 1999. 76 p.
9. Lovetskii K.P., Sevast'yanov L.A., Bikeev O.N. *Matematicheskii sintez opticheskikh nanostuktur* [Mathematical synthesis of optical nanostructures]. Moscow, RUDN Publ., 2008. 143 p.
10. Himmelblau D. *Applied Nonlinear Programming*. Texas, McGraw-Hill Book Company, 1972. 536 p. (Russ. ed.: Khimmel"blau D. *Prikladnoe nelineinoe programmirovaniye*. Moscow, Mir Publ., 2075. 536 p.).
11. Rykov A.S. *Sistemnyi analiz: modeli i metody prinyatiya reshenii i poiskovoi optimizatsii* [System analysis: models and methods of decision making and search engine optimization]. Moscow, Publishing House of MISiS, 2009. 608 p.
12. Besekerskii V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [The theory of automatic control systems]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2003. 752 p.
13. Igumnov I.V., Kucyi N.N. Formirovaniye ShIM-elementa s ispol'zovaniem iskusstvennykh neironnykh setei [Formation of the PWM cell using artificial neural networks]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2014, no. 6 (89), pp. 31–35.
14. Kucyi N.N. *Avtomaticheskaya parametricheskaya optimizatsiya diskretnykh sistem regulirovaniya*. Diss. doct. tekhn. nauk [Automatic parameter optimization of discrete systems regulation. Dr. eng. sci. diss.]. Moscow, 1997. 386 p.
15. Slepov N.N., Drozdov B.V. *Shirotno-impul'snaya modulyatsiya: (analiz i primenenie v magnitnoi zapisi)* [Pulse width modulation (analysis and application in the magnet. Recording)]. Moscow, Energiya Publ., 1978. 191 p.

УДК 004:523

Автоматическое распознавание музыкальных нот*

А.А. КОНЕВ¹, А.А. ОНИЩЕНКО², Е.Ю. КОСТЮЧЕНКО³, А.Ю. ЯКИМУК⁴

¹ 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 40, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, кандидат технических наук, доцент. E-mail: kaa1@keva.tusur.ru

² 634050, РФ, г. Томск, ул. Гагарина, 7, ООО «Тензор», инженер органа криптографической защиты. E-mail: veganwin@gmail.com

³ 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 40, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, кандидат технических наук, доцент. E-mail: key@keva.tusur.ru

⁴ 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 40, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, аспирант. E-mail: yau@keva.tusur.ru

В данной работе рассматривается процесс распознавания музыкальных нот. В качестве входных данных может выступать звуковой файл, в котором находится запись мелодии. Источником звука при записи мелодии может выступать одиночный музыкальный инструмент, их набор, а также голос человека, напевающего мелодию. Входной файл изначально представлен в формате .wav или записывается в этом формате с микрофона. Обработка осуществляется путем последовательного определения частоты основного тона сигнала и преобразованием значения частоты основного тона в соответствующую ноту. Проводится сравнение программ, реализующих алгоритмы выделения частоты основного тона. Специфика исследования заключается в использовании на первом этапе алгоритмов выделения частоты основного тона с учетом особенностей слуховой системы человека, воспринимающей звук. Применение этих алгоритмов, с одной стороны, позволяет достичь более точного определения значения по сравнению с аналогами, в частности с пиковыми методами. С другой стороны, используемые в настоящий момент в модели слуховой системы человека гребенки фильтров имеют ограничение верхней частоты основного тона в 400 Гц, так как приспособлены для работы с обычной речью. Это является недостатком, поскольку при исполнении мелодий, например, оперными певцами частота основного тона может достигать 1400 Гц. Однако, это ограничение не является принципиальным и требует дополнительного исследования на предмет возможности расширения гребенки фильтров, моделирующих слуховую систему человека. Второй этап представляет собой преобразование выделенной частоты основного тона к ноте на основе разработанного алгоритма. Алгоритм базируется на таблицах соответствия частот нотам с учетом их минимальной продолжительности. Представлены результаты тестирования программы, реализующей эти алгоритмы. В заключении представлены основные результаты работы и ее последующее развитие: расширение диапазона допустимых к распознаванию частот.

* Статья получена 01 июня 2015 г.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания ТУСУР на 2015 г. (проект № 3657).

Ключевые слова: распознавание нот, частота, основной тон, спектр звука, обработка звука, фильтрация звука, вокал, нотная запись

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-32-47

ВВЕДЕНИЕ

Мир человека наполнен звуками различного происхождения. Среди них голоса людей и животных, звуки технологических приборов и агрегатов, природных явлений, бытовой шум и т. д. Большую часть звуков человек производит сам при разговорах или пении. Выражая свои эмоции, он использует свой голос. Это и стало в древности предпосылками создания музыкальной грамоты – системы отображения звуков на бумаге.

Перед многими непрофессиональными музыкантами стоит проблема перевода своего вокального и музыкального творчества в партитуры (ноты), соответствующие правилам сольфеджио (нотной грамоты). Автоматическое распознавание звучащих нот при помощи специального программного обеспечения позволило бы ускорить и повысить удобство записи партитур. Существует множество решений для преобразования воспроизводимой мелодии в нотную запись [1–3], однако подавляющее большинство из них предназначено для работы с музыкальными инструментами и не способно качественно работать с мелодиями, напеваемыми только голосом. Решения, позволяющие работать только с голосом, тоже существуют [4], однако они предназначены именно для идентификации мелодии, а не для получения нотной записи.

Человеческий голос при пении занимает гораздо больший диапазон частот, нежели при разговоре. Так, голос типичной женщины при разговоре имеет частоту от 165 до 255 Гц, а при пении варьируется от 130 до 739 Гц. Профессиональные певцы имеют голосовой диапазон куда больше, чем обычный человек. В среднем голосовой диапазон составляет 73,91...1396,90 Гц [5].

На основе этого можно сделать заключение, что, с одной стороны, для автоматического преобразования можно использовать стандартные подходы для выделения частоты основного тона; с другой стороны, у таких подходов могут возникнуть проблемы в области верхних частот и может потребоваться модификация алгоритмов выделения частоты основного тона.

1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ НОТ И ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМОГО БАЗОВОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Рынок программного обеспечения, предлагающего пользователю функции распознавания частот и нот, достаточно обширен, но не всегда программы соответствуют заявленному качеству или вовсе не справляются с поставленными задачами. Из множества программ были выбраны PRAAT, разработанная в Университете Амстердама [6], SR-0, разработанная в ТУСУР, и Melodine [7], специализирующаяся непосредственно на распознавании нот и разработанная в Мюнхене.

В качестве базовой программы использованы программа исследования речевых сигналов SR0, разработанная в ТУСУРе, а именно один из ее моду-

лей – модуль определения частоты основного тона и его дальнейшая модификация pitch-track.

Учитывая, что базовая программа и использованные в ней алгоритмы определения частоты основного тона [8] были рассчитаны на работу с речью, а не с вокалом, диапазон «видения» разрабатываемой программы на данный момент ограничивается возможностями базового программного обеспечения, а именно от 73 до 400 герц.

Для дальнейшей работы из базового программного обеспечения взят модуль выделения частоты основного тона на основе системы фильтров, использующих особенности слуховой системы человека. В качестве входных данных этого модуля при условии постоянства его параметров (они были выбраны на ранних этапах исследований, связанных с оценкой точности определения частоты основного тона [9, 10], и позволяют получать результаты с погрешностью не более 0,6 % [11], что существенно превышает точность, получаемую на основе пиковых методов, использующих быстрое преобразование Фурье [12] и основанных на применении мел-кепстральных коэффициентов [13] и других классических методов [14]) выступает только звуковой сигнал, подаваемый в формате .wav или приводимый к этому формату в режиме реального времени в процессе записи звука. На выходе этого модуля – частота основного тона в любой (в текущий в случае обработки в режиме реального времени) момент времени. Экранная форма данного модуля Pitch-track представлена на рис. 1.

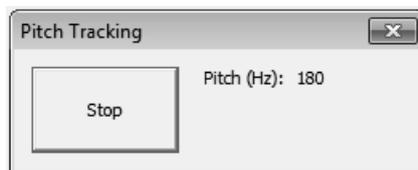


Рис. 1. Экранная форма Pitch-track

При этом модуль может быть использован и без графического интерфейса при использовании его в разрабатываемом программном обеспечении.

2. СРАВНЕНИЕ С АНАЛОГАМИ ЧАСТИ, ОТВЕЧАЮЩЕЙ ЗА ВЫДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ ОСНОВНОГО ТОНА И ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА БАЗОВОЙ ПРОГРАММЫ

Для тестирования выбранных программ было определено несколько стратегий:

- тестирование коротких звуков (стаккато),
- тестирование звуков, находящихся на минимальном интервале,
- тестирование звуков, находящихся в среднем интервале,
- тестирование звуков с произношением слов,
- тестирование мелодии с произношением слов.

По заданным стратегиям был составлен план тестирования. В него входят 9 записей с разными вариациями воспроизведения:

- локация: малая октава. Диапазон: до – си. 12 нот. Интервал: полутон. Длительность: две ноты в секунду;

- локация: первая октава. Диапазон: до – си. 12 нот. Интервал: полутон. Длительность: одна нота в секунду;
- локация: малая октава. Ноты: до, ми, соль, до, соль, ми, до. Длительность: две ноты в секунду;
- локация: первая октава. Ноты: до, ми, соль, до, соль, ми, до. Длительность: одна нота в секунду;
- локация: малая октава. Ноты: до, ми, соль, до, соль, ми, до. Стаккато;
- локация: первая октава. Ноты: до, ми, соль, до, соль, ми, до. Стаккато;
- локация: малая октава. Ноты: до, ми, соль, до, соль, ми, до. Длительность: две ноты в секунду. С произношением названий нот;
- локация: первая октава. Ноты: до, ми, соль, до, соль, ми, до. Длительность: две ноты в секунду. С произношением названий нот;
- мелодия со словами.

Каждая аудиозапись записана женским голосом и имеет следующие параметры:

- расширение wav,
- частота дискретизации 12 кГц,
- контрольная сумма 16 бит,
- канал моно.

Примеры полученных результатов представлены на рис. 2–7.

Эталонные частоты для программ Praat и Melodine выделены пунктирной линией.

1) Локация: малая октава. Диапазон: до – си. 12 нот. Интервал: полутон. Длительность: две ноты в секунду.

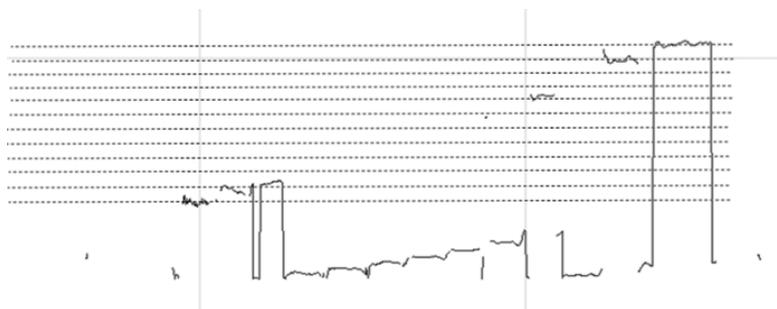


Рис. 2. Тест № 1. Программа Praat

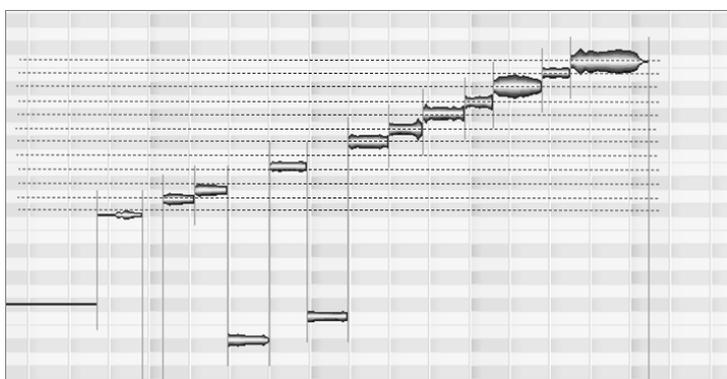


Рис. 3. Тест № 1. Программа Melodine

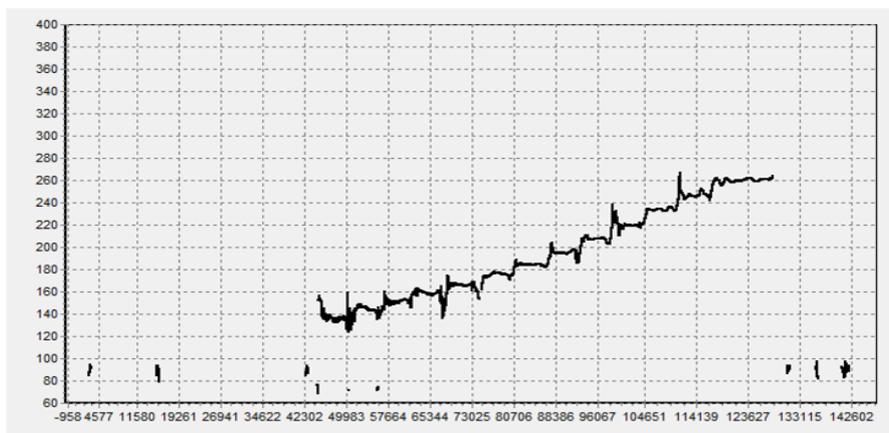


Рис. 4. Тест № 1. Программа Sr-0

2) Мелодия со словами.

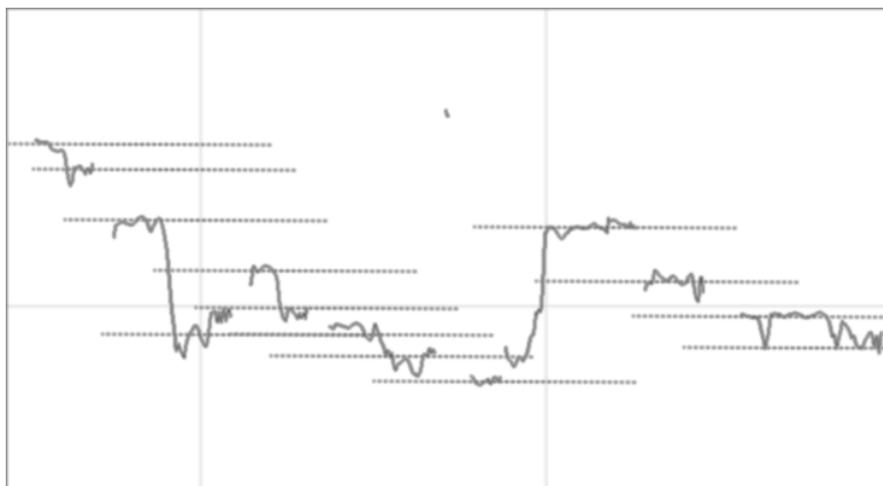


Рис. 5. Тест № 9. Программа Praat

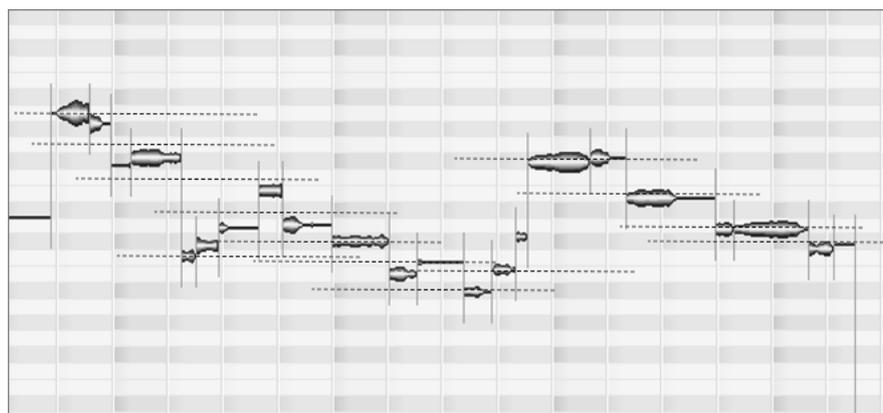


Рис. 6. Тест № 9. Программа Melodine



Рис. 7. Тест № 9. Программа Sr-0

В результате исследовательских работ было доказано, что для получения параметров вокального сигнала, необходимых для вычисления частоты тона, лучше всего использовать программный комплекс, реализующий модель периферической части слуховой системы человека. Было сделано 9 аудиозаписей, которые содержали 82 ноты для определения. В месте с продуктом Sr-0, который, собственно, и реализует модель периферической части слуховой системы человека, были протестированы программные комплексы Praat и Melodine. На графике можно увидеть результат (рис. 8). Sr-0 справился с определением нот лучше всех, определив 85 % от общего количества. На основе его и был построен алгоритм определения нот.

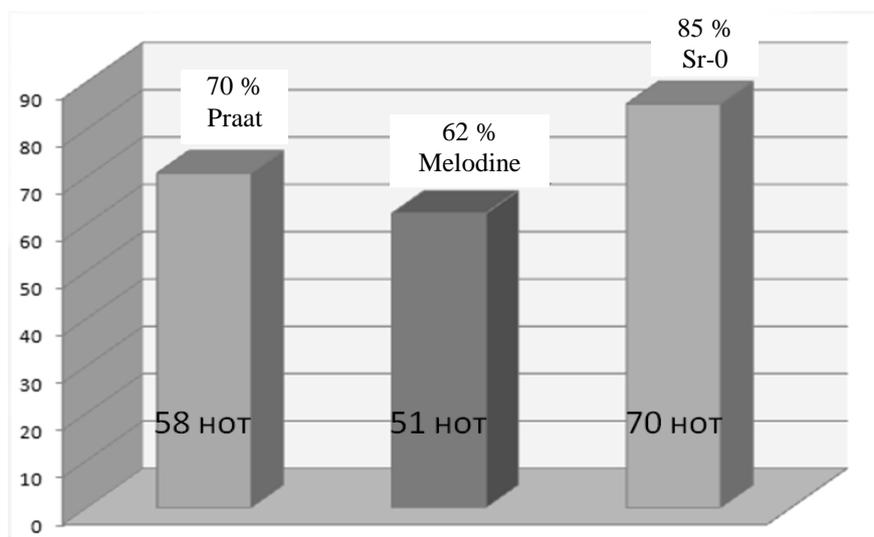


Рис. 8. Результат исследования

3. СТРУКТУРА И ОСНОВНОЙ АЛГОРИТМ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ НОТ

В основу разрабатываемого программного обеспечения положен подход последовательного получения частоты основного тона голоса при помощи базового программного обеспечения и преобразование этой частоты в ноту. Между нотами и частотами существует зависимость. Каждой ноте соответствует определенная частота. Это утверждение не является обратимым – существуют некоторые частоты, которым не соответствуют ноты (таблица) [15].

Соответствие нот частотам

Частота, Гц	Обозначение ноты	Суб- контр-	Контр-	Большая	Малая	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
Нота		октава	октава	октава	октава	октава	октава	октава	октава	октава
До	C	–	32.70	65.41	130.82	261.63	523.25	1046.50	2093.00	4186.00
До-диез	C	–	34.65	69.30	138.59	277.18	554.36	1108.70	2217.40	4434.80
Ре	D	–	36.95	73.91	147.83	293.66	587.32	1174.60	2349.20	4698.40
Ре-диез	D	–	38.88	77.78	155.56	311.13	622.26	1244.50	2489.00	4978.00
Ми	E	20.61	41.21	82.41	164.81	329.63	659.26	1318.50	2637.00	5274.00
Фа	F	21.82	43.65	87.31	174.62	349.23	698.46	1396.90	2793.80	–
Фа-диез	F	23.12	46.25	92.50	185.00	369.99	739.98	1480.00	2960.00	–
Соль	G	24.50	49.00	98.00	196.00	392.00	784.00	1568.00	3136.00	–
Соль- диез	G	25.95	51.90	103.80	207.00	415.30	830.60	1661.20	3332.40	–
Ля	A	27.50	55.00	110.00	220.00	440.00	880.00	1720.00	3440.00	–
Си- бемоль	B	29.13	58.26	116.54	233.08	466.16	932.32	1864.60	3729.20	–
Си	H	30.87	61.74	123.48	246.96	493.88	987.75	1975.50	3951.00	–

Алгоритм модуля, реализующего предложенную идею, представлен на рис. 9.

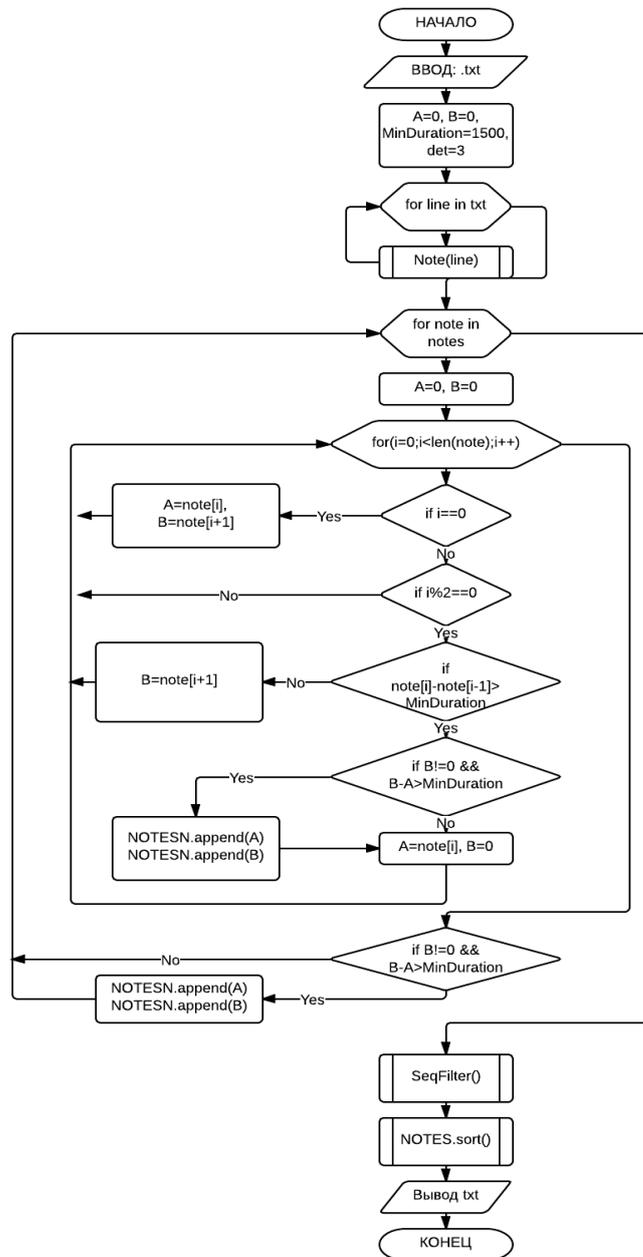


Рис. 9. Общая блок-схема алгоритма определения нот

В рамках данного алгоритма используются следующие обозначения:

A – начало ноты;

B – конец ноты;

MinDuration – минимальная длительность ноты;

Det – диапазон ноты / 2;

Line – строка из файла;

Note() – функция определения принадлежности частоты к ноте;

notes – массив найденных нот;

note – ноты из массива notes;

NOTESN – массив нот после проверки на минимальную длительность;

SeqFilter() – подпрограмма фильтрации 1-м и 2-м способами.

NOTES.sort() – подпрограмма сортировки нот по появлению в записи.

Готовая программа состоит из нескольких модулей, структуру можно увидеть на рис. 10.

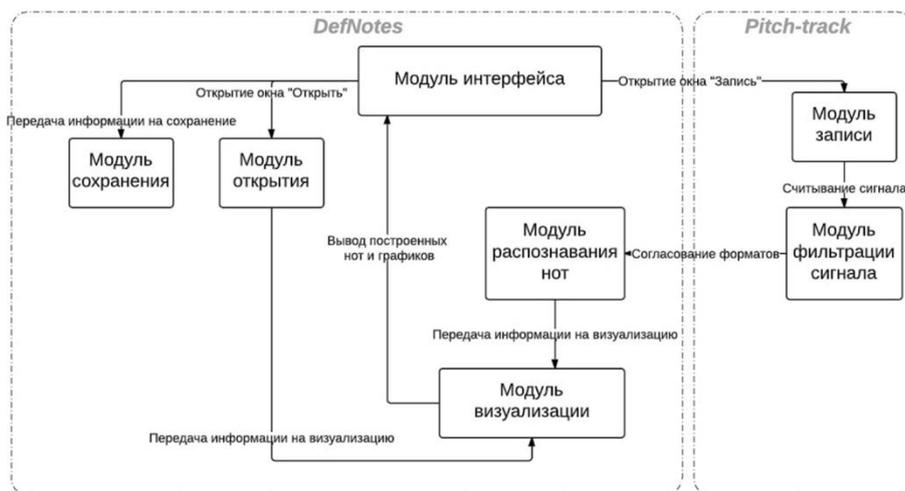


Рис. 10. Модули программы

4. ТЕСТИРОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ НОТ

Для тестирования программы были сделаны 16 записей: 8 – женским голосом, 8 – мужским.

8 записей женского голоса включают в себя следующее:

локация 1: первая октава. Ноты: до, ре, ми, фа, соль, фа, ми, ре, до. Стаккато (отрывисто), без произношения нот (только звуки);

локация 2: первая октава. Ноты: до, ре, ми, фа, соль, фа, ми, ре, до. Легато (связанно), без произношения нот (только звуки);

локация 3: первая октава. Ноты: си, ре#, фа#, ре#, си. Стаккато, без произношения нот;

локация 4: малая октава, первая октава. Ноты: си, ре#, фа#, ре#, си. Легато, без произношения нот;

локация 5: малая октава, первая октава. Ноты: ля, ля#, си, до, до#, до, си, ля#, ля. Стаккато, без произношения нот;

локация 6: малая октава, первая октава. Ноты: ля, ля#, си, до, до#, до, си, ля#, ля. Легато, без произношения нот;

локация 7: первая октава. Ноты: до, ми, ре, фа, ми, соль. Стаккато, с произношением нот;

локация 8: первая октава. Ноты: до, ми, ре, фа, ми, соль. Легато, с произношением нот.

Отличие мужского набора записей заключалось в отсутствии в записи № 5 Стакато двух последних нот ля# и ля ввиду проблем их воспроизведения отрывисто неподготовленным мужским голосом.

Результаты для ряда тестов представлены на рис. 11–13, сверху – выход частоты основного тона, середина – постоянная составляющая частоты основного тона (среднее значение), снизу – полученная нотная запись.

Локация 1: первая октава. Ноты: до, ре, ми, фа, соль, фа, ми, ре, до. Стакато (отрывисто), без произношения нот (только звуки).

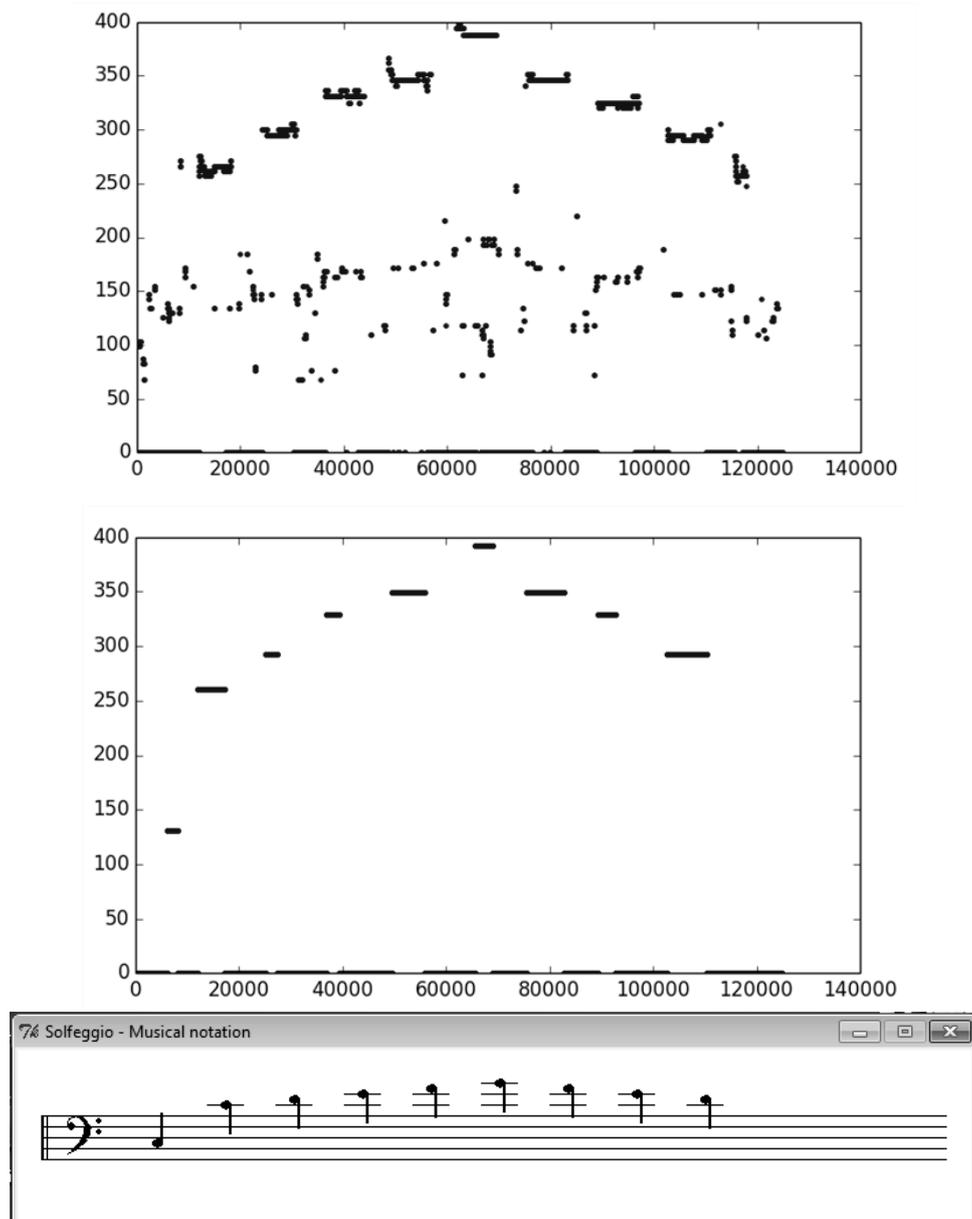


Рис. 11. Запись № 1, женский голос

Локация 4: малая октава, первая октава. Ноты: си, ре#, фа#, ре#, си. Легато, без произношения нот.

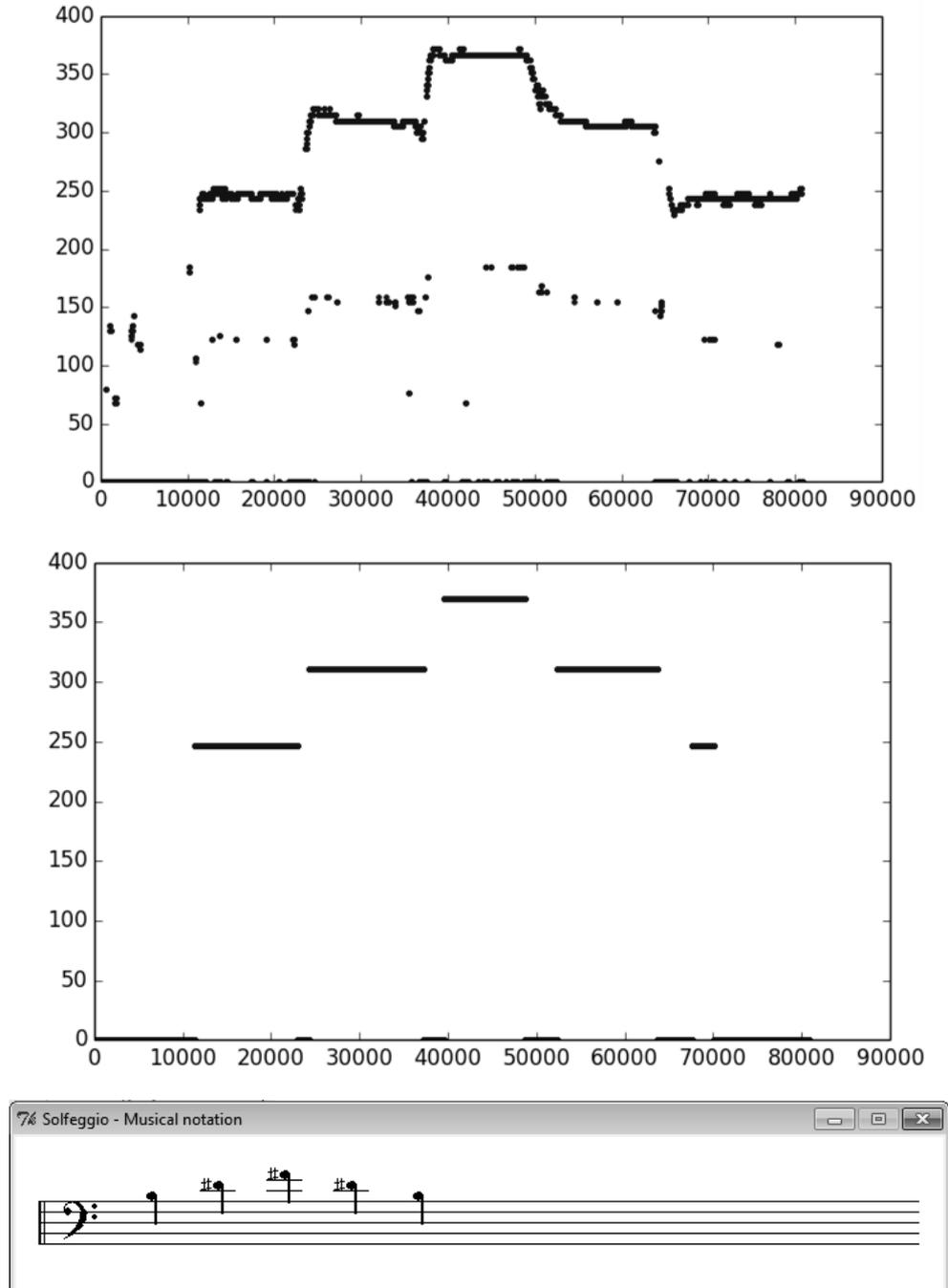


Рис. 12. Запись № 4, женский голос

Локация 1: малая октава. Ноты: до, ре, ми, фа, соль, фа, ми, ре, до. Стaccкато (отрывисто), без произношения нот (только звуки).

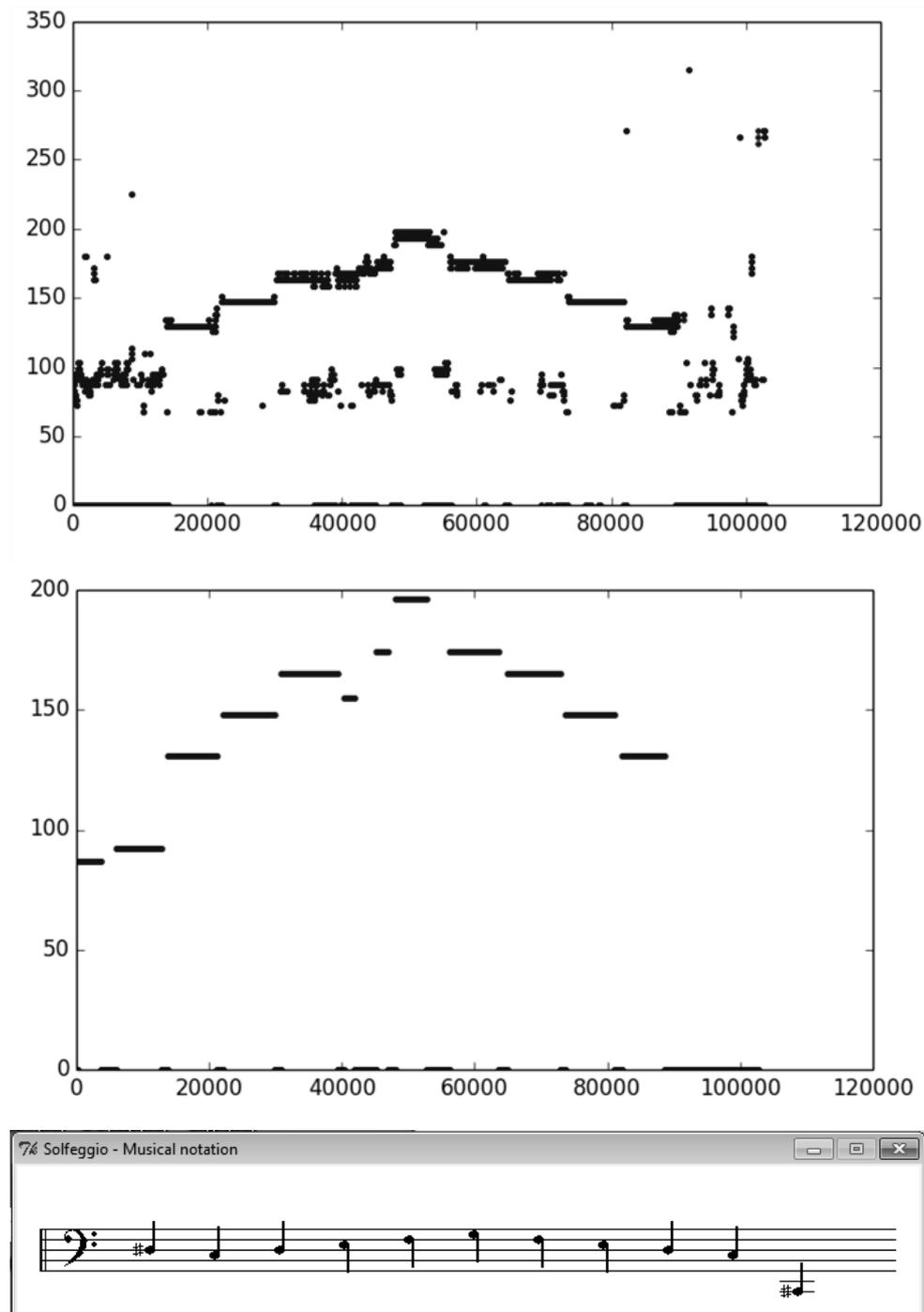


Рис. 13. Запись № 1, мужской голос

В 16 тестах были воспроизведены 114 нот, 58 из которых были спеты женским голосом, а 56 – мужским. На рис. 14 представлена результирующая диаграмма тестирования.

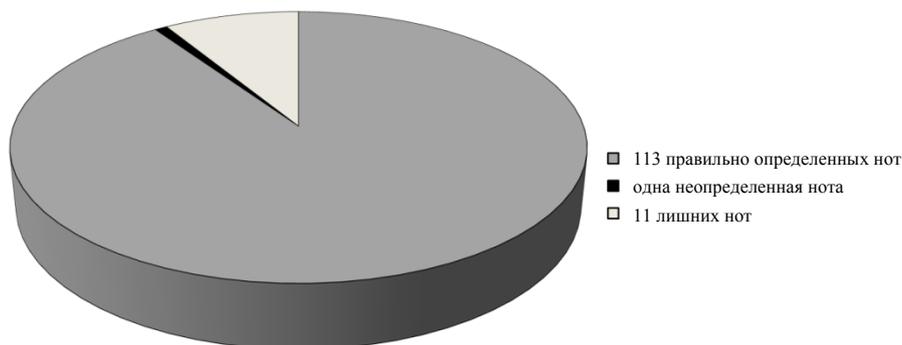


Рис. 14. Результирующая диаграмма тестирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная программа Defnotes позволяет пользователю автоматически переводить вокал в нотную запись. Нотная запись на выходе программы соответствует музыкальной грамоте, поэтому очень удобна для музыканта. Также программа выводит графики частот, что будет удобно для технически образованного пользователя.

Было проведено сравнение между программами, определяющими ЧОТ. Были проанализированы 9 аудиофайлов, содержащих 92 ноты для определения. Программа Sr-0, основанная на модели периферической части слуховой системы человека, справилась с тестированием лучше остальных, определив 85 % частот. Именно эта программа использовалась как базовая.

Для проверки программы был составлен план тестирования, включающий в себя типичные вокальные ситуации. Так же для полноты тестов исследовались как мужской, так и женский голос. Всего было сделано 16 записей, содержащих 114 нот для определения. Верно были определены 113 нот, одна нота не определилась и 11 нот были определены ошибочно.

В целом разработанное программное обеспечение справляется со своей задачей в области нижней части спектра, однако для применения в области частоты выше 400 Гц необходима дополнительная модификация базового программного обеспечения для расширения диапазона используемых каналов частот.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания ТУСУР на 2015 г. (проект № 3657).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Connect with the music you love [Electronic resource]. – Available at: <http://www.shazam.com/> (accessed: 07.10.2015).
2. The open music encyclopedia [Electronic resource]. – Available at: <http://www.musipedia.org/> (accessed: 05.10.2015).
3. Love that song but don't know what it is? Tunatic can tag it for you! [Electronic resource]. – Available at: <http://www.wildbits.com/tunatic/> (accessed: 05.10.2015).

4. The ultimate music search [Electronic resource]. – Available at: <http://www.midomi.com/> (accessed: 05.10.2015).
5. *Способин И.В.* Элементарная теория музыки. – М.: Музыка, 1968. – 203 с.
6. Praat: doing phonetics by computer [Electronic resource]. – Available at: <http://www.fon.hum.uva.nl/praat/> (accessed 07.10.2015).
7. The musical view of audio [Electronic resource]. – Available at: <http://www.celemony.com/en/melodyne/> (accessed: 05.10.2015).
8. *Черных Д.В., Конев А.А., Мещеряков Р.В.* Элементы программного комплекса для оценки биометрических параметров в защищенных системах // Электронные средства и системы управления. – 2011. – № 1. – С. 188–190.
9. *Конев А.А., Тихонова В.И.* Выделение вокализованных звуков в слитной речи // Акустика речи. Медицинская и биологическая акустика. Архитектурная и строительная акустика. Шумы и вибрации. Аэроакустика: сборник трудов XVI сессии Российского акустического общества. – М.: ГЕОС, 2005. – Т. 3. – С. 47–50.
10. Сравнение параметров для выделения вокализованных сегментов и классификации гласных фонем / С.А. Елистратов, М.А. Косенко, Е.Ю. Костюченко, А.А. Чичерин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – Т. 1, № 2. – С. 171–174.
11. *Конев А.А.* Модель и алгоритмы анализа и сегментации речевого сигнала: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2007. – 20 с.
12. *Mitre A., Queiroz M., Faria R.* Accurate and efficient fundamental frequency determination from precise partial estimates // Proceedings of the 4th AES Brazil Conference, May 2006. – Sao Paulo, 2006. – P. 113–118.
13. Estimation of pitch from speech signals [Electronic resource]. – Available at: iitg.vlab.co.in/?sub=59&brch=164&sim=1012&cnt=1 (accessed: 05.10.2015).
14. *Gerhard D.* Pitch extraction and fundamental frequency: history and current techniques: technical report TR-CS 2003-06. – Regina Saskatchewan, Canada: Department of Computer Science University of Regina, 2003. – 22 p.
15. *Тюлин Ю.Н.* Краткий теоретический курс гармонии. – М.: Музыка, 1978. – 168 с.

Конев Антон Александрович, кандидат технических наук, доцент Томского государственного университета. Основные направления научных исследований: анализ речевых сигналов, защита информации. Имеет более 60 публикаций. E-mail: kaal@keva.tusur.ru

Онищенко Александра Александровна, инженер органа криптографической защиты ООО «Тензор». Основное направление научных исследований – анализ звуковых сигналов. Имеет одну публикацию. E-mail: veganwin@gmail.com

Костюченко Евгений Юрьевич, кандидат технических наук, доцент Томского государственного университета. Основные направления научных исследований: анализ речевых сигналов, идентификация биометрических сигналов. Имеет более 60 публикаций. E-mail: key@keva.tusur.ru

Якимук Алексей Юрьевич, аспирант Томского государственного университета. Основное направление научных исследований – анализ звуковых и речевых сигналов. Имеет 5 публикаций. E-mail: yay@keva.tusur.ru

*Automatic recognition of music**

A.A. KONEV¹, A.A. ONISCHENKO², E.YU. KOSTYUCHENKO³, A.Yu. YAKIMUK⁴

¹ 634050, Russia, Tomsk, 40, Lenin Prospekt, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, Ph.D., associate professor. E-mail: kaa1@keva.tusur.ru

² 634050, Russia, Tomsk, 7, Gagarina St., Tensor Ltd Company, engineer, centre of cryptographic protection. E-mail: veganwin@gmail.com

³ 634050, Russia, Tomsk, 40, Lenin Prospekt, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Ph.D (Eng.), associate professor. E-mail: key@keva.tusur.ru

⁴ 634050, Russia, Tomsk, 40., Lenin Prospekt, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, a graduate student. E-mail: yay@keva.tusur.ru

In this paper the process of recognizing musical notes is described. A sound file which contains a record of a melody can be used as input data. A source of the sound in recording tunes can be a single musical instrument, a set of them as well as the voice of a man crooning a tune. Originally, an input file is presented in the .wav format or recorded in this format using a microphone. Processing is carried out by sequentially determining the fundamental frequency of the signal and converting the value of the pitch frequency into the corresponding A comparison of programs that implement algorithms for pitch frequency selection is made. Using fundamental frequency selecting algorithms which take into account the peculiarities of the human auditory system at the first stage is a specific character of the study. Using these algorithms, on the one hand, allows determining values more accurately in comparison with analogues, in particular with peak methods. On the other hand, filter banks currently used in models of the human auditory system, have an upper limit of the pitch frequency of 400 Hz as they are adapted for use with conventional speech.

This is a disadvantage because a pitch frequency can be up to 1400 Hz for opera singers. However, this limitation is not critical and requires further study for possible extension of the filter bank simulating the human auditory system. The second step is the conversion of the selected frequency pitch into a note on the basis of the algorithm. The algorithm is based on the tables of frequency correspondence to notes and note minimum duration. The results of testing the program implementing these algorithms are presented. In conclusion, the main results of the work and its subsequent development, namely, the expansion of the range acceptable for frequency identification are presented.

Keywords: music recognition, frequency, pitch, sound spectrum, sound processing, sound filtering, vocal, musical notation

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-32-47

REFERENCES

1. *Connect with the music you love*. Available at: <http://www.shazam.com/> (accessed 05.10.2015)
2. *The open music encyclopedia*. Available at: <http://www.musipedia.org/> (accessed 05.10.2015)
3. *Love that song but don't know what it is? Tunatic can tag it for you!* Available at: <http://www.wildbits.com/tunatic/> (accessed 05.10.2015)
4. *The ultimate music search*. Available at: <http://www.midomi.com/> (accessed 05.10.2015)
5. Sposobin I.V. *Elementarnaya teoriya muzyki* [Elementary music theory]. Moscow, Muzyka Publ., 1968. 203 p.

* Received 1 June 2015.

This work was supported by the Ministry of education and science of the Russian Federation within the framework of the base part of the state task TUSUR (TUCSR) 2015 (project number 3657).

6. Praat: doing phonetics by computer. Available at: <http://www.fon.hum.uva.nl/praat/> (accessed 05.10.2015)
7. The musical view of audio. Available at: <http://www.celemony.com/en/melodyne/> (accessed 05.10.2015)
8. Chernykh D.V., Konev A.A., Meshcheryakov R.V. Elementy programmnoy kompleksa dlya otsenki biometricheskikh parametrov v zashchishchennykh sistemakh [Elements of software for the evaluation of biometric parameters in protected systems]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya – Electronic instrumentation and control systems*, 2011, no. 1. pp. 188–190.
9. Konev A.A., Tikhonova V.I. Vydelenie vokalizovannykh zvukov v slitnoi rechi [Isolation voiced sounds in continuous speech]. *Akustika rechi. Meditsinskaya i biologicheskaya akustika. Arkhitekturnaya i stroitel'naya akustika. Shумы i vibratsii. Aeroakustika: sbornik trudov XVI sessii Rossiiskogo akusticheskogo obshchestva* [Acoustics of speech. Medical and biological acoustics. Architectural and building acoustics. Noise and vibration. Aeroacoustics. Proceedings of the XVI Session of the Russian Acoustical Society]. Moscow, GEOS Publ., 2005, vol. 3, pp. 47–50.
10. Elistratov S.A., Kosenko M.A., Kostyuchenko E.Yu., Chicherin A.A. Sravnenie parametrov dlya vydeleniya vokalizovannykh segmentov i klassifikatsii glasnykh fonem [Comparison of parameters for selection of voiced segments and classification of vowel phonemes]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2012, vol. 1, no. 2, pp. 171–174.
11. Konev A.A. *Model' i algoritmy analiza i segmentatsii rechevogo signala*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [The model and algorithms for the analysis and segmentation of the speech signal. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Tomsk, 2007. 20 p.
12. Mitre A., Queiroz M., Faria R. Accurate and efficient fundamental frequency determination from precise partial estimates. *Proceedings of the 4th AES Brazil Conference 2006*. Sou-Paulo, Brazil, 2006, pp. 113–118.
13. *Estimation of pitch from speech signals*. Available at: iitg.vlab.co.in/?sub=59&brch=164&sim=1012&cnt=1 (accessed 05.10.2015)
14. Gerhard D. *Pitch extraction and fundamental frequency: history and current techniques: technical report TR-CS-2003-06*. Regina, Saskatchewan, Canada, Department of Computer Science University of Regina, 2003. 22 p.
15. Tyulin Yu.N. *Kratkii teoreticheskii kurs garmonii* [A brief theoretical course of harmony]. Moscow, Muzyka Publ., 1978. 168 p.

УДК 621.396.218

Повышение точности оценок параметров исследуемых объектов импеданс-частотным методом*

С.П. НОВИЦКИЙ¹, А.Л. ПЕЧНИКОВ²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: novitskiysp@mail.ru

² 630087, РФ, г. Новосибирск, ул. Новогодняя, 24/2, инженер ООО «Версет». E-mail: pechnikov@ngs.ru

Предложен ряд новых методик оценки параметров исследуемых объектов (ИО), в частности электродного процесса (ЭП) с замедленными стадиями разряда (затруднен переход электронов через потенциальный барьер электродной границы) и диффузии (замедлена доставка потенциалопределяющих продуктов электрохимической реакции к электродной границе), моделируемого схемой замещения Эршлера–Рэндлса, а также параметров абсорбции конденсатора, по их импеданс-частотным характеристикам. Оценка сопротивления электролита R_e может быть получена усреднением значений действительной составляющей полного измеренного импеданса на высокой частоте. Оценка емкости двойного слоя C_d определяется как среднее значение отношения мнимой составляющей адмиттанса электродной границы к круговой частоте для верхнего диапазона частот. Оценки константы Варбурга A и сопротивления переноса заряда R_p определяются по действительной и мнимой компонентам оценки импеданса Фарадея после компенсации сопротивления электролита и емкости двойного слоя в полном измеренном импедансе ИО. Про- моделирован процесс измерения искомых параметров ИО при наличии в сигналах воздействия и отклика шумов с равномерным распределением амплитуды в диапазоне от 0 до 1 % полезного сигнала и фазы в диапазоне от 0 до 2π . Для получения более точных оценок параметров использовалось получение искомых параметров как средних значений оценок 10 отдельных экспериментов и получение оценок параметров из усредненного по 10 экспериментам полного импеданса ИО. Полученная оценка сопротивления электролита R_e использовалась для модельного эксперимента компенсации сопротивления электролита R_e и последующего получения оценок емкости двойного слоя C_d , константы Варбурга A и сопротивления переноса заряда R_p . Аналогичное моделирование выполнялось при определении параметров абсорбции конденсатора без учета шумов в сигналах воздействия и отклика. Применение этих методик обеспечивает повышение точности определения искомых параметров ИО на порядок и более. Это позволяет повысить достоверность сведений о свойствах ИО.

Ключевые слова: исследуемый объект, электрохимический импеданс, амплитудно- и фазочастотная характеристики, оценки параметров, сопротивление электролита, емкость двойного электрического слоя, константа Варбурга, сопротивление переноса заряда, погрешность

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-48-57

* Статья получена 17 июня 2015 г.

ВВЕДЕНИЕ

Получение достоверных сведений о процессах, протекающих в ИО, например электрохимических (ЭХО), является весьма важным при решении задач повышения эффективности процессов в гидрометаллургии, защите металлов от коррозии, получении сверхчистых металлов и др. Для определения параметров электродных процессов, параметров конденсаторов и других электро- и радиотехнических элементов в медицине и биологии широко используется импеданс-частотный метод [1–17]. Однако, вследствие невозможности прямого измерения искомых параметров точность их определения невысокая.

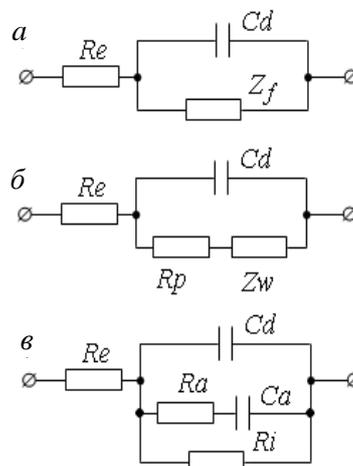
В настоящей работе для повышения точности измерения параметров электродных процессов, параметров абсорбции конденсаторов и других ИО предложен ряд модификаций импеданс-частотного метода. Показано, что использование импеданс-частотного метода с предварительным определением и компенсацией сопротивления электролита и емкости двойного электрического слоя [16] и усреднения результатов измерений является весьма эффективным. Это позволяет снизить на порядок и более погрешности определения искомых параметров исследуемых объектов.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Электродные процессы, протекающие на границе электрод – электролит, по своему отклику на гармонический воздействующий сигнал (при амплитуде на электродной границе не более единиц милливольт) моделируются линейными электрическими двухполюсниками [1–5]. В общем случае электродный процесс моделируется схемой замещения рис. 1, *а*, где импеданс Z_f характеризует кинетику и механизм электродного процесса [1–14]. Протекание ЭП с замедленными стадиями электрохимической реакции [4] (затруднен переход электронов через потенциальный барьер электродной границы) и диффузии [5, 11] (замедлена доставка потенциалопределяющих продуктов электрохимической реакции к электродной границе) моделируется схемой рис. 1, *б* – схемой Эршлера–Рэндлса [1, 2], а экв ивалентная схема конденсатора при определении параметров абсорбции – схемой рис. 1, *в* [15].

Рис. 1. Схемы замещения электродных процессов и конденсатора для переменной составляющей электрического сигнала:

а – обобщенная схема замещения электродных процессов: R_e – сопротивление объема электролита, C_d – емкость двойного электрического слоя, Z_f – фарадеевский импеданс; *б* – схема с замедленными стадиями перехода заряда электронов через потенциальный барьер электродной границы (сопротивление R_p) и диффузии, где $Z_w = A(1-j)/\sqrt{\omega}$ – импеданс замедленной стадии диффузии (импеданс Варбурга), A – константа Варбурга, ω – круговая частота; *в* – схема замещения конденсатора с параметрами абсорбции: R_a и C_a – сопротивление и емкость абсорбции соответственно, R_i – сопротивление утечки конденсатора



Из рис. 1 видно, что ни один из элементов приведенных схем замещения не доступен прямому измерению. Поэтому для определения параметров схем замещения используют различные интерпретации импеданс-частотных характеристик ИО [2–14].

Цель данной работы – предложить методы измерения и обработки импеданс-частотных характеристик ИО, использование которых существенно повысит точность измерения искомых параметров их схем замещения, а также сформулировать требования к основным погрешностям измерительной аппаратуры, реализующей эти методы.

2. МЕТОД РЕШЕНИЯ

Классический метод определения искомых параметров ЭП основан на предварительном измерении импеданс-частотной характеристики суммарного импеданса ЭП, модель которого соответствует схеме рис. 1, а. Выражение для импеданса схемы замещения рис. 1, а в частотной области имеет вид

$$Z = Re + [1 / (j\omega Cd + 1 / (Z_f))] . \quad (1)$$

Годограф импеданса для схемы замещения рис. 1, б, полученный для области частот $10^{-3} \dots 10^4$ Гц, приведен на рис. 2. При построении рис. 2 введены обозначения: $rZ = \text{real}(Z)$ – действительный компонент полного импеданса Z ЭП; $iZ = \text{imag}(Z)$ – мнимый компонент полного импеданса Z ЭП. В области высоких частот rZ стремится к значению сопротивления электролита Re , т. е.

$$eRe = rZ_{\omega \rightarrow \omega_{\max}} . \quad (2)$$

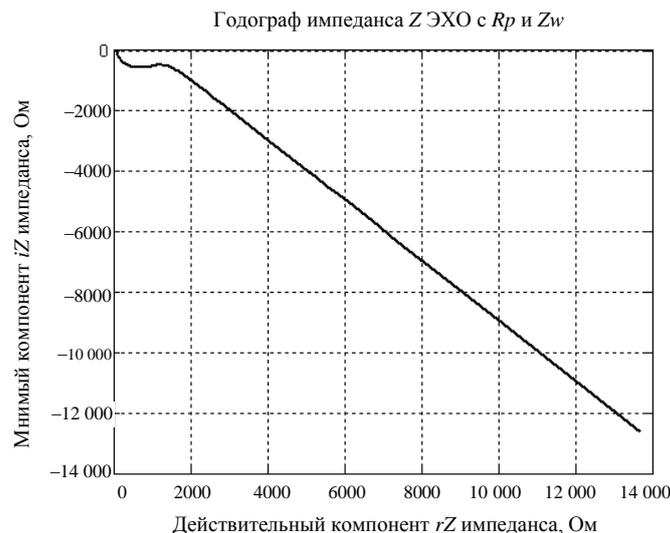


Рис. 2. Годограф импеданса для схемы замещения рис. 1, б:

$$Re = 100 \text{ Ом}, Cd = 10 \text{ мкФ}, Rp = 1000 \text{ Ом}, \text{ константа Варбурга } A = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{с}^{-1/2}$$

Значение eRe , полученное в выражении (2) в обычном классическом импеданс-частотном методе, принимают за оценку значения сопротивления электролита Re . При постановке измерительного эксперимента учтем, что в реальных условиях результаты измерений отягчены аддитивным шумом со случайными амплитудой и фазой. Методика введения такого шума, учет и снижение его влияния на результаты измерений искомых параметров импеданса ИО пояснены ниже.

2.1. Модель измерительного эксперимента

Примем, что схема замещения ЭП с замедленными стадиями перехода и диффузии (см. рис. 1, б) имеет следующие параметры: $Re = 100$ Ом, $Cd = 10$ мкФ, $Rp = 1000$ Ом, константа Варбурга $A = 1000$ Ом \cdot с^{-1/2}. Измерения импеданса ЭХО проводятся в гальваностатическом режиме [1] со значением модуля гармонической составляющей тока $|I| = |Uz| / |Zmax|$, где $|Uz| = 5 \cdot 10^{-3}$ В и $|Zmax| = \max(\text{abs}(Z))$ соответственно максимальные значения модулей напряжения на ЭХО и его импеданса. В рассматриваемом эксперименте сигнал воздействия – гармонический ток I через ЭХО – имеет одинаковую амплитуду и нулевую начальную фазу для всех 64 рабочих частот, задаваемых по логарифмическому закону в диапазоне от 10^{-3} до 10^4 Гц. Ниже для пояснения способа моделирования эксперимента приводятся части программного кода (выделены жирным шрифтом) среды Matlab.

Исходные данные для схемы рис. 1, б:

```

Re=100 %Ом; Rp=1000 % Ом; Cd=10^-5 % Ф;
A=1000; % константа Варбурга, Ом*с^(-1/2)
N=64; % количество отсчетов в частотной области
fmin=10^-3; % нижняя частота измерительного сигнала, Гц
fmax=10^4; % верхняя частота измерительного сигнала, Гц
w=2*pi.*f; % вектор-строка круговых частот
Numb = 10; % количество независимых по аддитивному шуму экспериментов
Zw=(A*(1-j))./sqrt(w); % импеданс Варбурга
Zf=Rp+Zw; % импеданс Фарадея
Y3=(j.*w.*Cd)+1./(Zf); % адмиттанс электродной границы
Z=Re+(1./Y3); % полный импеданс Z ЭХО
rZ = real(Z); % действительный компонент импеданса Z ЭХО
iZ = imag(Z); % мнимый компонент импеданса Z ЭХО

```

Теоретический годограф импеданса Z ЭХО приведен на рис. 2.

Данные измерительного эксперимента.

Модуль тока I воздействующего сигнала:

```

I(1:N) = 5*10^-3/max(abs(Z)); % I(1:64) = 0.2685*10^-6 А – вектор-строка модуля гармонического тока, протекающего через ЭХО, с нулевой фазой для всех 64 частот.

```

Отклик сигнала – напряжение U на ЭХО:

```

U=I.*Z; % вектор-строка напряжения на ЭХО

```

Создадим вначале по 10 идентичных строк ($Numb=10$) незашумленных сигналов воздействия и отклика, в которых каждая вектор-строка $UU(i) = U$ и $II(i) = I$ содержит по 64 отсчета сигнала, полученных для различных частот:

```

for i=1:Numb; UU(i,:) = U; II(i,:)=I; end;

```

Сформируем 10 вектор-строк значений векторов помехи для сигнала воздействия I с равномерным распределением модуля в диапазоне $[0...1]$ % от значения модуля тока I на любой частоте измерительного сигнала, а фазы – с равномерным распределением в диапазоне $[0; 2\pi]$:

```
for i=1:Numb; errI(i,:)=((abs(I)./100).*rand(1,N)) .* exp(j.*(2*pi.*rand(1,N)));  
end;
```

Аналогичным образом получим 10 вектор-строк помехи для сигнала отклика U :

```
for i=1:Numb; errU(i,:)=((abs(U)./100).*rand(1,N)) .*  
exp(j.*(2*pi.*rand(1,N))); end;
```

Ниже массивы Im и Um содержат зашумленные сигналы воздействия и отклика для 10 экспериментов и моделируют процесс измерения (индекс m):

```
Im = I + errI; Um = U + errU;
```

Измеренный импеданс ИО может быть получен как отношение сигналов отклика и воздействия:

```
Zm = Um./Im;
```

Получим теперь усредненный по десяти экспериментам измеренный импеданс ЭХО с 64 частотными отсчетами.

```
Zms =sum(Zm)./10; % усредненный измеренный импеданс ЭХО  
rZms=real(Zms); % 64 отсчета действительного компонента импеданса  
Zms  
iZms=imag(Zms); % 64 отсчета мнимого компонента импеданса Zms
```

2.2. Определение параметров ЭХО по частотной зависимости измеренного импеданса

2.2.1. Определение оценки eRe сопротивления электролита Re

Базовый вариант. Оценка сопротивления электролита eRe производится по минимальному значению реальной составляющей импеданса Zm [2] в области высоких частот:

```
for i=1:Numb; eRe(i)=min(rZm(i,:)); end;
```

Новый вариант. Оценка сопротивления электролита выполняется усреднением значений реальной составляющей полного импеданса в диапазоне высоких частот (для трех или более верхних частотных отсчетов):

```
for i=1:Numb; eRe_new(i)=mean(rZm(i,60:64)); end; % eRe по пяти верхним  
частотам
```

Усредненные по десяти экспериментам оценки дают более достоверный результат:

```
eRe_avr=mean(eRe); eRe_new_avr=mean(eRe_new);
```

Кроме того, оценка сопротивления электролита может быть получена по усредненному импедансу Zms :

```
eRe_s=min(rZms); eRe_new_s=mean(rZms(60:64));
```

2.2.2. Определение оценки емкости двойного слоя Cd

Далее приводится описание способа определения оценок Cd и параметров фарадеевской ветви для случая использования усредненного по десяти экспериментам полного импеданса Zms . Для исключения из полного импе-

данса Z_{ms} сопротивления электролита используется его оценка eRe_new_s как наиболее достоверная:

Zk=Zms-eRe_new_s; % вычет сопротивления электролита

Yk=1./(Zk); % проводимость нескомпенсированного остатка импеданса

Оценка емкости двойного слоя eCd определяется как среднее значение отношения мнимой составляющей адмиттанса Yk к круговой частоте для пяти отсчетов в верхнем частотном диапазоне:

eCd=imag(Yk)./w; % вектор-строка оценки eCd с 64 отсчетами

eCd_avr=mean(eCd(60:64)); % усредненная оценка емкости Cd по пяти частотным отсчетам

Для определения параметров импеданса Фарадея вначале получим оценку адмиттанса фарадеевской ветви:

Ym_kk = Yk -j*eCd_avr.*w; % оценка комплексной проводимости фарадеевской ветви

Zm_kk = 1./Ym_kk; % остаточный фарадеевский импеданс

rZm_kk = real(Zm_kk); % действительный компонент импеданса Фарадея

iZm_kk = imag(Zm_kk); % мнимый компонент импеданса Фарадея

2.2.3. Определение оценки константы Варбурга

Оценка константы Варбурга eA определяется по мнимой компоненте оценки импеданса Фарадея iZm_kk для нижнего диапазона частот:

eA = -Im_kk(1:5) .* sqrt(w(1:5)); % оценки константы Варбурга eA для пяти нижних частот

eA_avr = mean(eA) ; % среднее значение оценок eA по пяти нижним частотам и десяти экспериментам

2.2.4. Определение оценки сопротивления переноса заряда

Оценка сопротивления переноса заряда eRp определяется по реальной и мнимой компонентам оценки импеданса Фарадея iZm_kk в области нижних частот:

eRp = rZm_kk(10:20)+ iZm_kk(1:10);

eRp_avr = mean(eRp_mx);

2.2.5. Моделирование процесса аппаратной компенсации сопротивления электролита

Аппаратная компенсации влияния сопротивления электролита на выходной сигнал измерителя организуется путем введения в измерительную цепь равного по модулю, но отрицательного по знаку напряжения $-I eRe$. Процесс компенсации, выполненный с погрешностью 1 %, может быть промоделирован следующим образом:

for i=1:Numb; k_U(i,:) = UU(i,:) - П(i,).*eRe_avr*0.99; end;

Далее для получения оценок параметров ЭХО должны быть использованы процедуры по п. 2.2.1–2.2.4, причем величина оценки сопротивления электролита будет соответствовать оценке нескомпенсированного остатка сопротивления электролита.

Ниже в таблице сведены максимальные относительные погрешности оценок параметров Re , Cd , A , Rp для ЭП с замедленными стадиями переноса заряда и диффузии, полученные для различных методик.

Максимальные погрешности оценок параметров ЭП, %

Метод	δRe_{max}	δCd_{max}	δA_{max}	δRp_{max}
Оценки одного из экспериментов	1,7	41,0	1,3	8,6
Среднее оценок 10 отдельных экспериментов; оценка Re получена по новому варианту (см. текст)	0,2	15,0	0,25	1,8
Оценки, полученные из усредненного по 10 экспериментам полного импеданса ИО	0,1	0,45	0,21	0,32
Усредненные по 10 экспериментам оценки после инструментальной компенсации сопротивления Re	0,13	0,32	0,10	0,23

2.3. Определение параметров конденсатора

В схеме замещения конденсатора (см. рис. 1, в) приняты следующие значения параметров: $Re = 10$; % сопротивление электролита, Ом;
 $Ra = 10^3$; % сопротивление абсорбции, Ом;
 $Ri = 10^5$; % сопротивление утечки (параллельный процесс), Ом;
 $Cd = 10^{-5}$; % емкость двойного слоя, Ф;
 $Ca = 10^{-4}$; % емкость абсорбции, Ф.

Из анализа импеданс-частотной зависимости конденсатора в диапазоне $10^{-3} \dots 10^4$ Гц, выполненного по методике, близкой к представленной выше, но без учета шумов, определены и скомпенсированы параметры Re , Cd и сопротивление утечки Ri . При этом получены относительные погрешности оценок искомых параметров (в %): $rRe = 0.04407$; $rRi = 0.47931$; $rCd = 0.00043$; $rRa = -0.00824$; $rCa = -0.00972$. При расширении частотного диапазона до 10^{-4} Гц относительная погрешность $rRi = -0.00525$ %. Учет наличия шума приводит к возрастанию погрешностей искомых параметров конденсатора примерно на порядок.

ВЫВОДЫ

1. Измерения импеданс-частотных зависимостей ИО при предварительном усреднении десяти и более осложненных шумами экспериментов, при определении и компенсации сопротивления электролита Re и емкости двойного слоя Cd (по методу [16]) позволяют по сравнению с известными импеданс-частотными методами [1–14] снизить не менее чем на порядок погрешности оценок искомых параметров, т. е. выполнить их измерение с относительной погрешностью, не превышающей 0,5 %.

2. Для выполнения операций компенсации сопротивления электролита и емкости двойного электрического слоя необходимо создавать соответствующие измерительные цепи, обеспечивающие погрешность компенсации, не превышающую 0,5 %. Использование таких цепей и рассмотренных выше методик определения искомых параметров ИО позволит создавать специализированные автоматизированные измерительные системы класса 0,5 и 1,0. Такие системы могут быть эффективно использованы в электрохимии [1–14], биологии и медицине [17], электро- и радиотехнике [16] и других областях народного хозяйства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Графов Б.М., Укие Е.А. Электрохимические цепи переменного тока. – М.: Наука, 1973. – 128 с.
2. Лейкус Д.И. Об интерпретации результатов измерения импеданса в электрохимических исследованиях // Электрохимия. – 1965. – Т. 1, № 4. – С. 472–476.
3. Баркер Дж.К. Аперiodические эквивалентные электрические цепи для фарадеевского импеданса // Основные вопросы современной теоретической электрохимии: труды 14 Совещания Международного комитета по электрохимической термодинамике и кинетике / под ред. А.Н. Фрумкина. – М.: Мир, 1965. – С. 42–90.
4. А.с. 1779985 СССР. Способ отдельного измерения параметров электродной границы при замедленной стадии разряда / С.П. Новицкий (СССР). – № 4883272/21; заявл. 14.11.90; опубл. 07.12.92, Бюл. № 45. – 4 с.
5. А.с. 1817011 СССР. Способ отдельного измерения параметров электродной границы при замедленной стадии диффузии / С.П. Новицкий (СССР). – № 4915594/21; заявл. 28.11.90; опубл. 23.05.93, Бюл. № 19.
6. Schon G., Weisbeck W., Lorenz W.J. High-frequency impedance spectroscopy of fast electrode reactions // Journal Electroanalytical Chemistry. – 1987. – Vol. 229, N 1/2. – P. 407–421.
7. Sluyters J.H. On the impedance of galvanic cells. 1. Theory // Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas. – 1960. – Vol. 79, iss. 9/10. – P. 1092–1100. – doi: 10.1002/recl.19600791013.
8. Sluyters J.H., Oomen J.J.C. On the impedance of galvanic cells. 2. Experimental verification // Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas. – 1960. – Vol. 79, iss. 9/10. – P. 1101–1110.
9. Stoynov Z., Savova-Stoynov B. Spectral impedance analysis of electrochemical system // International Society of Electrochemistry, 37th Meeting, Vilnius, USSR, 24–31 August 1986: extended abstracts. – Vilnius, 1986. – Vol. 3. – P. 332–333.
10. Uksche E.A., Bukun N.G., Frumkin A.N. Investigation of the electric double layer in salts melts // Electrochimica Acta. – Vol. 9, N 1. – P. 31–44.
11. Warburg E. Über das Verhalten sogenannter unpolarisierbarer Elektroden gegen Wechselstrom // Annalen der Physik und Chemie. – 1899. – Vol. 67. – P. 493–499.
12. Whitehouse D.R. Analysis and interpretation of the interfacial impedance in adsorption kinetics // Journal of Electroanalytical Chemistry. – 1971. – Vol. 32, N 2. – P. 265–270.
13. Pilla A.A. A Transient impedance technique for the study of electrode kinetics // Journal of The Electrochemical Society. – 1970. – Vol. 117, iss. 4. – P. 467–477.
14. Rybalka K.V., Etman M. Application of the operational impedance method to investigation of the electrochemical behaviour of lead in sulphuric acid // Journal of Electroanalytical Chemistry. – 1983. – Vol. 148, N 1. – P. 73–78.
15. Энштейн С.Л. Схемы для определения коэффициента абсорбции конденсаторов // Электронная техника. Серия 8, Радиодетали. – 1967. – Вып. 1. – С. 107–112.
16. Патент 2204839 Российская Федерация. Измеритель параметров электрохимических объектов / С.П. Новицкий, А.Г. Матасов, А.Л. Печников, А.В. Филатов; заявитель и патентообладатель Новосибирский государственный технический университет. – № 2001112435/09; заявл. 04.05.01; опубл. 20.05.03, Бюл. № 14.
17. Азаров Ю.К., Дубровин Э.Д. Устройство для получения электроскопической информации о биологических объектах // Радиоэлектронные приборы для биологических и медицинских исследований. – М.: Наука, 1966. – 96 с.

Новицкий Станислав Поликарпович, доктор технических наук, профессор кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств факультета радиотехники и электроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – измерение электрических величин. Имеет более 200 публикаций, в том числе одну монографию. E-mail: novitskiysp@mail.ru

Печников Андрей Львович, магистр техники и технологии, инженер ООО «Версет». Имеет более 30 публикаций, в том числе одну монографию. E-mail: pechnikov@ngs.ru

Improving an estimation accuracy of research object parameters by the impedance spectroscopy method*

S. NOVITSKIY¹, A. PECHNIKOV²

¹Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D.Sc. (Eng.), professor. E-mail: novitskiysp@mail.ru

²Verset Ltd. Co., 24/2, Novogodnyaya Street, Novosibirsk, 630087, Russian Federation, M.Sc., engineer. E-mail: pechnikov@ngs.ru

In this paper, some new approaches are proposed to get parameter estimations of objects, specifically, an electrode process with a slow discharge stage (an electron transition through the electrode edge energy barrier is hindered) and a diffusion stage (delivery of potential-determining products of an electrochemical reaction to the electrode edge is slow) with this process being simulated by the Ershler-Rendlse equivalent circuit as well as to get capacitor absorption parameters by their impedance-frequency characteristics. An estimation of the electrolyte resistance R_e could be obtained by averaging real part values of the total impedance measured in a high frequency range. An estimation of the double layer capacitance C_d is determined as a mean value of the ratio between an imaginary part of the electrode edge admittance and a circular frequency for an upper frequency range. Estimations of the Warburg constant A and the charge transfer resistance R_p are made by real and imaginary parts of the Faraday impedance estimation obtained by compensating electrolyte resistance and double layer capacitance in the total impedance of the object under study. The process of measuring required object parameters was simulated under conditions of noise presence in impact and response signals with a uniform amplitude distribution in the 0-1% range of a useful signal and phase distribution in the 0-2 π range. To obtain more accurate parameter estimations, the required parameters obtained as mean estimation values in ten different experiments and parameters estimations obtained in ten experiments from the research object averaged total impedance were used. The obtained estimate of the electrolyte resistance R_e was used for the model experiment of the electrolyte resistance compensation (IR-compensation). After that estimations of the double layer capacitance C_d , the Warburg constant A and the charge transfer resistance R_p were obtained. Similar modeling was performed to find absorption parameters of the capacitor, with noise in impact and response signals being not taken into account. Applying these procedures leads to improving estimation accuracy of research object parameters by an order or more. This makes it possible to increase the reliability of information about research object features.

Keywords: research object, electrochemical impedance, amplitude- and phase-frequency characteristics, parameter estimation, electrolyte resistance, double layer capacitance, Warburg constant, charge transfer resistance, error

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-48-57

* Received 17 June 2015.

REFERENCES

1. Grafov B.M., Ukshe E.A. *Elektrokhimicheskie tsepi peremennogo toka* [Electrochemical circuits of alternate current]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 128 p.
2. Leikis D.I. Ob interpretatsii rezultatov izmereniya impedansa v elektrokhimicheskikh issledo-vaniyakh [About result interpretation of measurement impedance in electrochemical research]. *Elektrokhimiya – Electrochemistry*, 1965, vol. 1, no. 4, pp. 472–476.
3. Barker Dzh.K. [Aperiodic equivalent electrical circuited for Faraday impedance]. *Osnovnye voprosy sovremennoi teoreticheskoi elektrokhimii. Trudy 14 Soveshchaniya Mezhdunarodnogo komiteta po elektrokhimicheskoi termodinamike i kinetike* [Main questions of modern theoretical electrochemistry. Abstracts of 14th meeting International committee of electrochemical thermodynamics and kinetics]. Moscow, 1965, pp. 42–90.
4. Novitskiy S.P. *Sposob razdel'nogo izmereniya parametrov elektrodnoi granitsy pri zamedlennoi stadii razryada* [Method of separate measurement of parameters of an electrode edge for slow discharge stage]. Inventor's Certificate USSR, no. 1779985, 1992.
5. Novitskiy S.P. *Sposob razdel'nogo izmereniya parametrov elektrodnoi granitsy pri zamedlennoi stadii diffuzii* [Method of separate measurement of parameters of an electrode edge for slow suffusion stage]. Inventor's Certificate USSR, no. 1817011, 1993.
6. Schon G., Weisbeck W., Lorenz W.J. High-frequency impedance spectroscopy of fast electrode reactions. *Journal Electroanalytical Chemistry*, 1987, vol. 229, no. 1/2, pp. 407–421.
7. Sluyters J.H. On the impedance of galvanic sells. I. Theory. *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas*, 1960, vol. 79, no. 9/10, pp. 1092–1100. doi: 10.1002/recl.19600791013
8. Sluyters J.H., Oomen J.J.C. On the impedance of galvanic sells. II. Experimental verification. *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas*, 1960, vol. 79, no. 9/10, pp. 1101–1110.
9. Stoynov Z., Savova-Stoynov B. Spectral impedance analysis of electrochemical system. *International society of electrochemistry, 37th meeting, Vilnius, USSR: extended abstracts*. Vilnius, 24–31 August 1986, vol. 3, pp. 332–333.
10. Ukshe E.A., Bukun N.G., Frumkin A.N. Investigation of the electric double layer in salts melts. *Electrochimica Acta*, 1964, vol. 9, no. 1, pp. 31–44.
11. Warburg E. Uber das Verhalten sogenannter unpolarisierbarer elektroden gegen wechselstrom. *Annalen der Physik und Chemie*, 1899, vol. 67, pp. 493–499.
12. Whitehouse D.R. Analysis and interpretation of the interfacial impedance in adsorption kinetics. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 1971, vol. 32, no. 2, pp. 265–270.
13. Pilla A.A. A transient Impedance technique for the study of electrode kinetics. *Journal of the Electrochemical Society*, 1970, vol. 117, no. 4, pp. 467–477.
14. Rybalka K.V., Etman M. Application of the operational impedance method to investigation of the electrochemical behaviour of lead in sulphuric acid. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 1983, vol. 148, no. 1, pp. 73–78.
15. Epshtein S.L. Skhemy dlya opredeleniya koeffitsienta absorbtzii kondensatorov [Schemes for determination of capacity absorption factor]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 8, Radiodetali – Electronic technique. Series 8. Radiodevices*, 1967, no. 1, pp. 107–112.
16. Novitskiy S.P., Matasov A.G., Pechnikov A.L., Filatov A.V. *Izmeritel' parametrov elektrokhimicheskikh ob"ektov* [Meter of electrochemical objects parameters]. Patent RF, no. 2204839, 2003.
17. Azarov Yu.K., Dubrovin E.D. Ustroistvo dlya polucheniya elektroskopicheskoi informatsii o biologicheskikh ob"ektakh [Device for obtain electrochemical information about biological objects]. *Radioelektronnye pribory dlya biologicheskikh i meditsinskikh issledovaniy* [Radiotechnical devices for biological and medical researches]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 96 p.

УДК 519.23

Классификация регрессионных моделей на основе объема априорной информации*

В.С. ТИМОФЕЕВ¹, А.В. ФАДДЕЕНКОВ²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, доцент. E-mail: v.timofeev@corp.nstu.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: faddeenkov@corp.nstu.ru

В данной работе авторами предложена классификация регрессионных моделей. Основанием классификации служит объем априорной информации, доступной исследователю. При этом рассматриваются две основные задачи спецификации модели, с которыми сталкиваются исследователи. С одной стороны, используется информация о структуре регрессионной модели. Выделено три основных уровня: полная определенность, частичная неопределенность и полная неопределенность структуры модели. В первом случае предполагается, что структура модели априорно задана с точностью до неизвестных параметров. Во втором случае структура модели известна не полностью и недостающая часть будет компенсироваться непараметрической составляющей. В третьем случае структура модели не известна, что влечет использование только непараметрических методов.

В качестве второго базиса классификации предлагается использовать полноту априорной информации о распределении случайной составляющей модели. Здесь также предлагается выделять три уровня. Первый уровень соответствует случайным ошибкам с известным (с точностью до параметров) законом распределения. Второй уровень соответствует структурированным ошибкам, образованным линейными комбинациями или смесями случайных величин. Третий уровень является наиболее общим и соответствует отсутствию информации о структуре и распределении случайной составляющей. Различные комбинации уровней информированности о структуре модели и распределении случайной ошибки определяют девять основных групп моделей, каждой из которых соответствуют свои методы идентификации. В простейшем случае рассматриваются классические методы регрессионного анализа, основанные на использовании метода наименьших квадратов. При неполной информации рекомендуется использовать полупараметрические методы, основанные на сплайновой регрессии, моделях структурированной ошибки, универсальных распределениях.

Ключевые слова: регрессионная модель, структура модели, классификация, априорная информация, параметрические методы, непараметрические методы, полупараметрические методы, структурированная ошибка, компоненты дисперсии

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-58-68

* Статья получена 1 июля 2015 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 13-07-00299 а.

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Регрессионные модели являются одним из наиболее популярных инструментов прикладного статистического анализа. Решение задачи построения регрессионных моделей возможно проводить на основе множества различных подходов и методов. Как правило, эти различия связаны с объемом априорной информации, доступной исследователю на этапе постановки задачи. Естественно предположить, что в каждой конкретной ситуации можно подобрать наиболее подходящие методы решения. Однако на текущий момент нет четкого понимания границ эффективного применения тех или иных методов. В связи с этим авторами была предпринята попытка классификации регрессионных моделей, основанная на объеме априорной информации о структуре модели и свойствах случайной ошибки.

Рассмотрим в общем виде задачу восстановления регрессионной зависимости

$$y = f(x) + \varepsilon, \quad (1)$$

где y – наблюдаемый отклик; $f(x)$ – неизвестная функция; x – вектор значений входных факторов; ε – случайная составляющая. Задача состоит в том, чтобы на основе имеющихся наблюдений за переменными x и y наилучшим образом построить оценку функции $f(x)$.

Очевидно, что в зависимости от объема доступной априорной информации о свойствах функции $f(x)$ и случайной составляющей ε для решения данной задачи могут быть использованы различные методы. В частности, в классическом регрессионном анализе предполагается, что $f(x)$ задана с точностью до неизвестных параметров, т. е. $f(x) = f_0(x, \theta)$. Это приводит к регрессионному уравнению следующего вида:

$$y_i = f_0(x_i, \theta) + \varepsilon_i, \quad (2)$$

где y_i – значение отклика в i -м наблюдении ($i=1, 2, \dots, N$); x_i – значение вектора входных факторов в i -м наблюдении; θ – вектор неизвестных параметров; ε_i – случайная ошибка в i -м наблюдении.

Для модели (2) задача построения функции $f(x)$ сводится к задаче оценивания вектора неизвестных параметров θ . Наиболее известным методом оценивания θ является метод наименьших квадратов (МНК), для корректного применения которого необходимо, чтобы все ошибки ε_i были независимыми и имели одинаковое распределение с нулевым средним и дисперсией σ_ε^2 : $\varepsilon_i \sim (0, \sigma_\varepsilon^2)$, $i=1, 2, \dots, N$ [3].

Однако, на практике исследователь может не обладать полной информацией о структуре модели $f(x)$ и сведение модели к виду (2) с последующим использованием МНК не представляется возможным. Аналогичная ситуация возникает при анализе справедливости предположений о свойствах случайной ошибки. В связи с этим возникает задача анализа возможных уровней неопределенности в модели (1) и привязки к этим уровням соответствующих методов оценивания.

1. ОСНОВАНИЯ КЛАССИФИКАЦИИ

С одной стороны, рассмотрим доступную исследователю информацию о структуре модели $f(x)$. При этом выделим три основных уровня: полную определенность структуры модели, заданной с точностью до неизвестных параметров; частичную неопределенность – структура модели известна не полностью; полную неопределенность структуры модели. С другой стороны, были рассмотрены варианты информированности исследователя о распределении и структуре случайной составляющей модели (1). Здесь также выделим три уровня.

Первый уровень соответствует случайным ошибкам с известным (с точностью до параметров) законом распределения. Второй уровень соответствует структурированным ошибкам, образованным линейными комбинациями или смесями случайных величин. Третий уровень является наиболее общим и соответствует отсутствию информации о структуре и распределении случайной составляющей.

Различные комбинации уровней информированности о структуре модели и распределении случайной ошибки определяют девять основных групп моделей, каждой из которых соответствуют свои методы идентификации (см. таблицу).

Уровни неопределенности структуры модели и ошибок

		Модель		
		Известна (А)	Частично известна (В)	Не известна (С)
Ошибка	Простая ошибка (А)	(АА)	(АВ)	(АС)
	Структурированная ошибка (В)	(ВА)	(ВВ)	(ВС)
	Неизвестная ошибка (С)	(СА)	(СВ)	(СС)

2. ЭЛЕМЕНТЫ КЛАССИФИКАЦИИ

Ситуация (АА). Предполагается, что структура модели (2) известна с точностью до неизвестных параметров и имеется информация о виде распределения случайных ошибок. Классическим методом оценивания в данном случае является широко известный метод максимального правдоподобия (ММП) [4]. При нормальном распределении ММП-оценки совпадают с МНК-оценками. Кроме того, если справедливы условия теоремы Гаусса–Маркова, то оценки метода наименьших квадратов являются наилучшими (в смысле минимума дисперсии оценок) среди всех линейных несмещенных оценок. Это обстоятельство позволяет рекомендовать МНК даже для тех случаев, когда распределение случайных ошибок неизвестно. Недостатком данного метода является слабая устойчивость оценок к нарушениям предположений

теоремы Гаусса–Маркова [3, 4]. Решением проблемы может служить переход к специальным методам оценивания [13–15], в том числе разработанным авторами [2, 5, 6, 9, 11].

Ситуация (АВ). В данном случае относительно ошибки уровень определенности такой же, как в ситуации (АА), но при этом структура регрессионной модели известна только частично. Другими словами, вместо уравнения (2) следует рассматривать уравнение вида

$$y = f_0(x, \theta) + \eta(x) + \varepsilon, \quad (3)$$

где $\eta(x)$ – неизвестная компонента модели.

Такие модели получили название полупараметрических и в последнее время завоевывают все большую популярность среди исследователей [20]. При этом $f_0(x, \theta)$ называют параметрической частью модели, а $\eta(x)$ – непараметрической частью. Существуют различные подходы к идентификации модели (3), отличающиеся способами восстановления непараметрической части. Одним из вариантов полупараметрической регрессии является сплайновая регрессия

$$y = f_0(x, \theta) + \beta_1 f_1 + \beta_2 f_2 + \dots + \beta_k f_k + \varepsilon, \quad (4)$$

где $\eta(x) = \beta_1 f_1 + \beta_2 f_2 + \dots + \beta_k f_k$ – непараметрическая часть; f_1, f_2, \dots, f_k – специальные базисные функции; β_1, \dots, β_k – неизвестные параметры.

Преимущество данного подхода заключается в том, что сведение модели к виду (4) позволяет использовать известные методы классического регрессионного анализа, включая МНК. Однако, в зависимости от цели исследования в рамках данного подхода возможны различные варианты.

В частности, в случае линейной параметризации функции $f_0(x, \theta)$ полупараметрическая регрессионная модель может быть представлена в следующем виде:

$$y_i = \theta_1 x_{i1} + \dots + \theta_m x_{im} + \beta_1 f_{i1} + \beta_2 f_{i2} + \dots + \beta_k f_{ik} + \varepsilon_i, \quad (5)$$

где y_i – значение отклика в i -м наблюдении ($i = 1, 2, \dots, N$); x_{ij} – значение j -го регрессора в i -м наблюдении ($j = 1, 2, \dots, m$); $\theta_1, \dots, \theta_m, \beta_1, \dots, \beta_k$ – неизвестные параметры; $f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{ik}$ – значения базисных функций в i -м наблюдении; ε_i – случайная ошибка в i -м наблюдении ($i = 1, 2, \dots, N$).

Естественно, качество воспроизведения исходной зависимости напрямую зависит от количества и вида базисных функций. Однако излишнее усложнение модели может приводить к излишней подгонке линии регрессии под исходные данные.

Данная проблема традиционно решается дополнительным сглаживанием модели с переходом к так называемым «штрафным сплайнам» [16, 20]. Идея этого метода заключается в том, что для снижения излишнего влияния непараметрической части на ее параметры налагается ограничение (штраф) и вектор оценок параметров вычисляется следующим образом:

$$\hat{\Theta} = (X^T X + \lambda^2 D)^{-1} X^T Y, \quad (6)$$

где $\Theta = [\theta_1 \ \dots \ \theta_m \ \beta_1 \ \dots \ \beta_k]^T$, $Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_N]^T$,

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1m} & f_{11} & \dots & f_{1k} \\ x_{21} & \dots & x_{2m} & f_{21} & \dots & f_{2k} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & \dots & x_{Nm} & f_{N1} & \dots & f_{Nk} \end{bmatrix},$$

λ^2 – параметр сглаживания, D – $(m+k) \times (m+k)$ -матрица штрафа:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{(m \times m)} & 0_{(m \times k)} \\ 0_{(k \times m)} & I_{(k \times k)} \end{bmatrix}.$$

При $\lambda^2 = 0$ сглаживание непараметрической части не проводится и оценка (6) совпадает с обычной МНК-оценкой. Чрезмерное же увеличение параметра сглаживания ($\lambda^2 \rightarrow +\infty$) приводит к тому, что регрессионная модель (5) вырождается в модель, состоящую только из параметрической части. В связи с этим выбору величины параметра сглаживания следует уделять особое внимание.

Следует отметить, что спецификация модели (4) напрямую зависит от цели исследования и интерпретации непараметрической компоненты. В отдельных случаях полезно переходить к рассмотрению неизвестных параметров β_1, \dots, β_k как случайных величин, что приводит к построению модели со структурированной ошибкой или к ситуации (ВА).

Ситуация (ВА). Предполагается, что случайная составляющая модели обладает внутренней структурой и может быть представлена в виде линейной комбинации случайных величин

$$\varepsilon = \xi_1 v_1 + \xi_2 v_2 + \dots + \xi_m v_m,$$

где v_1, v_2, \dots, v_m – известные значения переменных, соответствующих случайным эффектам $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m$.

Одним из простейших вариантов подобных моделей является модель стохастического фронта [17]:

$$y = f_0(x, \theta) + \varepsilon, \quad (7)$$

где $\varepsilon = \xi_1 - \xi_2$, ξ_1 – случайная величина, аналогичная классической ошибке модели (2), часто имеющая нормальное распределение; ξ_2 – неотрицательная случайная величина. В зависимости от предположений о виде распределения величины ξ_2 для идентификации модели (7) используются различные варианты метода максимального правдоподобия.

Другим частным случаем является модель компонент дисперсии [19], в которой предполагается, что случайная составляющая зависит от некоторых случайных факторов

$$Y = X\Theta + e, \quad e = U_1\xi_1 + \dots + U_r\xi_r + \varepsilon, \quad (8)$$

где $\xi_i, i=1, \dots, r$ – векторы эффектов случайных факторов; $U_i, i=1, \dots, r$ – известные матрицы значений переменных, соответствующих r случайным факторам; $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_N)^T$ – вектор случайных ошибок.

При этом предполагается, что

$$\xi_i \sim (0, \sigma_i^2 I_{m_i}), \quad i=1, \dots, r,$$

$$\text{cov}(\xi_i, \xi_j) = 0, \quad i \neq j,$$

$$\text{cov}(\xi_i, \varepsilon) = 0, \quad \varepsilon \sim (0, \sigma_\varepsilon^2 I),$$

где m_i – число уровней i -го случайного фактора.

Или в более сжатой форме

$$e \sim (0, \sigma_1^2 V_1 + \dots + \sigma_r^2 V_r + \sigma_\varepsilon^2 I), \quad V_i = U_i U_i^T, \quad i=1, \dots, r.$$

Величины $\sigma_1^2, \dots, \sigma_r^2, \sigma_\varepsilon^2$ получили название «компоненты дисперсии», для их оценивания разработано множество методов [12, 19, 21]. Зная оценки компонент дисперсии, идентификацию модели можно провести, например, с помощью обобщенного МНК:

$$\hat{\Theta} = (X^T \Omega^{-1} X)^{-1} X^T \Omega^{-1} Y, \quad \text{где } \Omega = \sum_{i=1}^r \frac{\hat{\sigma}_i^2}{\hat{\sigma}_\varepsilon^2} U_i U_i^T + I.$$

Примером использования модели со структурированной ошибкой может послужить модель, рассмотренная в разделе 2 настоящего отчета.

Ситуация (АС). При полном отсутствии какой-либо информации о структуре модели (1) восстановление регрессионной зависимости возможно только с использованием непараметрических методов [18]. Наиболее известной и относительно простой оценкой отклика является ядерная оценка Надарая–Уотсона следующего вида:

$$\hat{y} = \hat{f}(x) = \frac{\sum_{i=1}^N y_i K\left(\frac{x_i - x}{h_x}\right)}{\sum_{i=1}^N K\left(\frac{x_i - x}{h_x}\right)}, \quad (9)$$

где $K(u)$ – функция ядра, h_x – ширина окна.

Точность восстановления отклика с использованием (4.9) напрямую зависит от выбора вида функции ядра и ширины окна. Среди множества из-

вестных видов ядер чаще других используются равномерное, треугольное, Епанечникова и Гаусса [18]. При выборе ширины окна следует принимать во внимание, что при слишком малых значениях h_x возникает эффект «недо-сглаживания», а при слишком больших значениях – эффект «пересглаживания».

Обобщением оценок Надарая–Уотсона является локальная полиномиальная регрессия [18].

Ситуация (СА). Отсутствие априорной информации о виде распределения случайной компоненты модели (2) не позволяет в явном виде использовать для оценивания неизвестных параметров метод максимального правдоподобия. Кроме того, фактически реализуемые на практике распределения случайных ошибок далеко не всегда удается представить в рамках тех или иных хорошо известных теоретических законов. Исследователь может лишь иметь общие представления о его форме и, возможно, сформулировать отдельные гипотезы о наличии тех или иных особенностей (например, сделать корректное предположение о значении математического ожидания). Следовательно, необходимо использовать алгоритмы идентификации, которые сами извлекают информацию о характере распределения из исходных данных и обладают определенной гибкостью для осуществления подстройки под многообразие фактически реализуемых распределений.

Одним из решений является переход к универсальным распределениям. Их основное преимущество состоит в возможности описания большого круга практических ситуаций. В качестве примера универсальных семейств распределений можно упомянуть кривые Пирсона, которые позволяют проводить анализ ситуаций с такими распределениями, как бета-, гамма-, Стьюдента, экспоненциальное и др. Еще более широким является обобщенное лямбда-распределение, включающее не только хорошо известные в теории вероятности распределения, но и целое множество других. Перспективным также представляется переход в комплексную область посредством построения характеристической функции, что обеспечит привлечение более полной информации и позволит идентифицировать так называемые устойчивые распределения. Они также представляют собой весьма широкий класс распределений, включающий распределения с большой или даже бесконечной дисперсией (например, распределение Коши). Это обстоятельство делает его предпочтительным при исследовании закономерностей на основе сильно засоренных данных.

Процедура оценивания параметров модели $f_0(x, \theta)$ в данной ситуации носит итерационный характер. При этом на каждой итерации происходит идентификация распределения случайных остатков с последующим построением функции правдоподобия и оценивание регрессионных параметров методом максимального правдоподобия. Более подробно с особенностями использования этой процедуры для упомянутых универсальных семейств распределений можно ознакомиться в работах [2, 6, 7, 11].

Другим вариантом оценки распределений остатков является использование непараметрических или полупараметрических методов, позволяющих построить эмпирическую функцию плотности с последующим переходом к функции правдоподобия и итерационной процедуре, описанной выше [8].

Ситуации (ВВ) и (СВ). Специфической особенностью данных ситуаций является одновременная неопределенность структуры модели и структуры ошибки. При этом ошибка в выборе спецификации модели будет сказываться на свойствах остатков, а также на качестве определения структуры ошибки.

Методы идентификации регрессионных зависимостей, разработанные специально для таких условий, авторам неизвестны. Тем не менее в качестве возможного инструмента можно рекомендовать применение алгоритмов, аналогичных ситуациям (АВ) и (ВА), но с использованием устойчивых методов оценивания. Примеры решения авторами подобных задач можно найти в работах [1, 10].

Ситуации (ВС) и (СС). Как и в случае ситуации (АС), для оценивания значений отклика используются непараметрические подходы. Однако, степень информированности о распределении и структуре ошибки позволяет более корректно выбирать методы оценивания и определять их внутренние параметры. Например, при использовании ядерных оценок это влияет на выбор вида функции ядра и ширины окна. Кроме того, по мнению авторов, предпочтение следует отдавать более гибким методам, например, локально полиномиальной регрессии, сплайновой регрессии и др. [16, 18]. Следует отметить, что, как и в предыдущем случае, степень изученности данной постановки задачи очень низка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена классификация регрессионных моделей, основанная на объеме априорной информации о структуре модели и свойствах случайной ошибки. Выделено девять основных групп моделей, включая модели с полностью известной структурой, известной частично и полностью неизвестной, а также при известном законе распределения случайной ошибки, известном частично и неизвестном. Для каждой из групп определены базовые методы и алгоритмы идентификации. Данная классификация является более общей по сравнению с традиционными и позволяет принимать более обоснованные решения при выборе инструментов анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устойчивое оценивание нелинейных структурных зависимостей / В.И. Денисов, А.Ю. Тимофеева, Е.А. Хайленко, О.И. Бузмакова // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2013. – № 4. – С. 47–60.
2. Денисов В.И., Тимофеев В.С. Устойчивые распределения и оценивание параметров регрессионных зависимостей // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318, № 2. – С. 10–15.
3. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: пер. с англ. – М.: Статистика, 1973. – 392 с.
4. Рао С.Р. Линейные статистические методы и их применение. – М.: Наука, 1968. – 548 с.
5. Тимофеев В.С. Оценивание параметров регрессионных зависимостей на основе характеристической функции // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 2 (39). – С. 43–52.
6. Тимофеев В.С. Оценивание параметров регрессионных зависимостей с использованием кривых Пирсона. Ч. 1 // Научный вестник НГТУ. – 2009. – № 4 (37). – С. 57–67.

7. Тимофеев В.С. Оценивание параметров регрессионных зависимостей с использованием кривых Пирсона. Ч. 2 // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 1 (38). – С. 57–63.
8. Тимофеев В.С. Ядерные оценки плотности при идентификации уравнений регрессии // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 3 (40). – С. 41–50.
9. Тимофеев В.С., Вострецова Е.А. Устойчивое оценивание параметров регрессионных моделей с использованием идей метода наименьших квадратов // Научный вестник НГТУ. – 2007. – № 2 (27). – С. 57–67.
10. Тимофеев В.С., Фаддеенков А.В., Щеколдин В.Ю. Исследование алгоритмов оценивания параметров модели со структурированной ошибкой с использованием знакового метода // Научный вестник НГТУ. – 2005. – № 2 (20). – С. 71–84.
11. Тимофеев В.С., Хайленко Е.А. Адаптивное оценивание параметров регрессионных моделей с использованием обобщенного лямбда-распределения // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2010. – № 2 (15). – С. 25–36.
12. Фаддеенков А.В. Алгоритмы анализа линейных регрессионных моделей по панельным данным // Научный вестник НГТУ. – 2007. – № 3 (28). – С. 65–78.
13. Робастность в статистике: подход на основе функций влияния / Ф. Хампель, Э. Рончетти, П. Рауссеу, В. Штаэль. – М.: Мир, 1989. – 512 с.
14. Хьюбер П. Робастность в статистике. – М.: Мир, 1984. – 303 с.
15. Шурыгин А.М. Прикладная статистика: робастность, оценивание, прогноз. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 224 с.
16. Friedman J.H. Multivariate adaptive regression splines (with discussion) // Annals of Statistics. – 1991. – N 19. – P. 1–141.
17. Kumbhakar S.C., Knox Lovell C.A. Stochastic frontier analysis. – New York: Cambridge University Press, 2003. – 344 p.
18. Pagan A., Ullah A. Nonparametric econometrics. – New York: Cambridge University Press, 1999. – 424 p.
19. Rao C.R., Kleffe J. Estimation of variance components and applications. – New York: North-Holland, 1988. – 374 p. – (North-Holland series in statistics and probability; vol. 3).
20. Ruppert D., Wand M.P., Carroll R.J. Semiparametric regression. – New York: Cambridge University Press, 2003. – 404 p.
21. Sahai H., Ojeda M. Analysis of variance for random models: theory, methods, applications, and data analysis. Vol. 2. Unbalanced data. – Boston: Birkhäuser, 2005. – 480 p.

Тимофеев Владимир Семенович, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной информатики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – разработка и исследование устойчивых методов и алгоритмов анализа многофакторных объектов, в том числе с использованием непараметрической статистики. Имеет более 80 публикаций, в том числе один учебник. E-mail: v.timofeev@corp.nstu.ru

Фаддеенков Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной информатики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – разработка и исследование методов и алгоритмов анализа многофакторных объектов со структурированной ошибкой. Имеет более 40 публикаций, в том числе один учебник. E-mail: faddeenkov@corp.nstu.ru

The classification of regression models based on the amount of a priori information*

V. TIMOFEEV¹, A. FADDEENKOV²

¹ Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), associate professor. E-mail: v.timofeev@corp.nstu.ru

² Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), associate professor. E-mail: faddeenkov@corp.nstu.ru

In this paper, a new classification of regression models is proposed. The basis of the classification is the capacity of a priori information available to the researcher. Two main tasks of model specification facing researchers are considered. On the one hand, the information about the regression model structure is used. Three main levels of the model structure are considered, namely, a complete certainty, a partial uncertainty and a complete uncertainty. In the first case, it is assumed that the model structure is set up to unknown parameters. In the second, case the model structure is not completely known and the missing part is compensated by a nonparametric component. In the third case, the model structure is unknown, which involves the use of nonparametric methods only. It is proposed to use the completeness of a priori information about the distribution of the random component of the model as a second basis of classification. Here it is also proposed to determine three levels. The first level corresponds to the case of random errors with the known distribution law (accurate within parameters). The second level corresponds to the case of structured errors formed by linear combinations or mixtures of random variables. The third level is general and corresponds to the case with no information about the structure and distribution of the random component. Various combinations of knowledge of the model structure and the distribution of the random error form nine main groups of models with their identification methods. Classical methods of regression analysis based on the least square method are considered in the simplest case. With incomplete information, it is recommended to use semi-parametric methods based on spline regression models, structured error models and universal distributions.

Keywords: regression model, model structure, classification, a priori information, parametric methods, nonparametric methods, semiparametric methods, structured error, variance components

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-58-68

REFERENCES

1. Denisov V.I., Timofeeva A.Yu., Khailenko E.A., Buzmakova O.I. Ustoichivoe otsenivanie nelineinykh strukturnykh zavisimostei [Robust estimation of nonlinear structural models]. *Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki – Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 2013, no. 4, pp. 47–60.
2. Denisov V.I., Timofeev V.S. Ustoichivye raspredeleniya i otsenivanie parametrov regressionnykh zavisimostei [Robust distributions and parameter estimation regression]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no 2, pp. 10–15.
- 3 Draper N.R., Smith H. *Applied regression analysis*. New York, John Wiley&Sons, 1966. 407 p. (Russ. ed.: Dreiper N.R., Smit G. *Prikladnoi regressionnyi analiz*. Moscow, Statistika Publ., 1973. 392 p.).
4. Rao C.R. *Linear Statistical Inference and its Applications*. New York, Wiley, 1967. 625 p. (Russ. ed.: Rao S.R. *Lineinye statisticheskie metody i ikh primenenie*. Moscow, Nauka Publ., 1968. 548 p.).

* Received 1 July 2015.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research as part of a research project №13-07-00299 a.

5. Timofeev V.S. Otsenivanie parametrov regressionnykh zavisimostei na osnove kharakteristicheskoi funktsii [The characteristic function in parameter estimation problem for regression model]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2010, no. 2 (39), pp. 43–52.
6. Timofeev V.S. Otsenivanie parametrov regressionnykh zavisimostei s ispol'zovaniem krivykh Pirsona. Ch. 1 [The Pirson's curves in parameter estimation problem for regression model. Pt. 1]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2009, no. 4 (37), pp. 57–67.
7. Timofeev V.S. Otsenivanie parametrov regressionnykh zavisimostei s ispol'zovaniem krivykh Pirsona. Ch. 2. [The Pirson's curves in parameter estimation problem for regression model. Pt. 2]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2010, no. 1 (38), pp. 57–63.
8. Timofeev V.S. Yadernye otsenki plotnosti pri identifikatsii uravnenii regressii [The Kernel estimation of density function in the regression identification problem]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2010, no. 3 (40), pp. 41–50.
9. Timofeev V.S., Vostretsova E.A. Ustoichivoe otsenivanie parametrov regressionnykh modelei s ispol'zovaniem idei metoda naimen'shikh kvadratov [Robust estimation of regression model parameters based on ideas of least-square method]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2007, no. 2 (27), pp. 57–67.
10. Timofeev V.S., Faddeenkov A.V., Shchekoldin V.Yu. Issledovanie algoritmov otsenivaniya parametrov modeli so strukturovannoi oshibkoi s ispol'zovaniem znakovogo metoda [Investigation of algorithms for estimating the parameters structured error model using sign method]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2005, no. 2 (20), pp. 71–84.
11. Timofeev V.S., Khailenko E.A. Adaptivnoe otsenivanie parametrov regressionnykh modelei s ispol'zovaniem obobshchennogo lyambda-raspredeleniya [Adaptive estimation of regression models parameters using generalized lambda-distribution]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2010, no. 2 (15), pp. 25–36.
12. Faddeenkov A.V. Algoritmy analiza lineinykh regressionnykh modelei po panel'nym dannym [The analysis algorithms of linear regression models on panel data]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2007, no. 3 (28), pp. 65–78.
13. Hampel F.R., Ronchetti E.M., Rousseeuw P.J., Stahel W.A. *Robust statistics: the approach based on influence functions*. New York, Wiley, 1986 (Russ. ed.: Khampel' F., Ronchetti E., Rausseu P., Shtael' V. *Robastnost' v statistike: podkhod na osnove funktsii vliyaniya*. Moscow, Mir Publ., 1989. 512 p.).
14. Huber P.J. *Robust Statistics*. New York, Wiley, 1981 (Russ. ed.: Kh'yuber P. *Robastnost' v statistike*. Moscow, Mir Publ., 1984. 303 p.).
15. Shurygin A.M. *Prikladnaya statistika: robastnost', otsenivanie, prognoz* [Applied statistics: robustness, estimation, forecast]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2000. 224 p.
16. Friedman J.H. Multivariate adaptive regression splines (with discussion). *Annals of Statistics*, 1991, no. 19, pp. 1–141.
17. Kumbhakar S.C., Knox Lovell C.A. *Stochastic frontier analysis*. New York, Cambridge University Press, 2003. 344 p.
18. Pagan A., Ullah A. *Nonparametric econometrics*. New York, Cambridge University Press, 1999. 424 p.
19. Rao C.R., Kleffe J. *Estimation of variance components and applications. North-Holland Series in Statistics and Probability*. Vol. 3. New York, North-Holland, 1988. 374 p.
20. Ruppert D., Wand M.P., Carroll R.J. *Semiparametric regression*. New York, Cambridge University Press, 2003. 404 p.
21. Sahai H., Ojeda M. *Analysis of variance for random models: theory, methods, applications, and data analysis*. Vol. 2. *Unbalanced data*. Boston, Birkhäuser, 2005. 480 p.

УДК 65.072.2

Метод ситуационного управления сложными системами на основе сбалансированной системы показателей*

А.А. ХАНОВА¹, Н.С. УРАЗАЛИЕВ², З.А. УСМАНОВА³

¹ 414056, РФ, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Астраханский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: akhanova@mail.ru

² 414056, РФ, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Астраханский государственный технический университет, аспирант. E-mail: urazaliev.n.s@mail.ru

³ 414056, РФ, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Астраханский государственный технический университет, аспирант. E-mail: slataarturovna@gmail.com

В данной работе приводится описание метода формирования и выбора вариантов управленческих решений, включающего определение проблемной ситуации по набору показателей сбалансированной системы показателей и наличия или отсутствия сходных ей ситуаций во множестве типовых ситуаций. Формализована структура процедуры управления, включающая следующие блоки: предварительной обработки, оценки состояния, выдачи управленческих решений, принятия решений. Определен состав блока предварительной обработки, включающий операции загрузки показателей сбалансированной системы показателей, формирования множества существенных показателей, загрузки соответствующего существенным показателям множества управленческих решений по решающей таблице соответствия, устранения дубликатов и противоречий среди множества управленческих решений. Представлено описание процедуры формирования и выдачи управленческих решений по принципу Гурвица, определены критерии выбора управленческих решений, ранжированы функции полезности. Предложен подход к анализу и оценке нечеткой ситуации в сложной системе на основании отклонения значений показателей сбалансированной системы показателей от нормы путем описания ситуации через лингвистические переменные. Учитывая разнообразие структур ситуаций, определяемых стратегическими картами сбалансированной системы показателей для каждой конфигурации сложной системы, перед поиском ситуации, сходной с проблемной ситуацией, предложена процедура просеивания ситуаций. Построена ситуационная модель. Описана процедура выдачи управленческих решений, включающая корректировку множества управленческих решений по составу и параметрам, классификацию и параметризацию управленческих решений. Выделены классы управленческих решений для предложенной процедуры принятия решений на основе имитационной модели. Предложен метод формирования и выбора управленческих решений, сочетающий использование четкой и нечеткой информации о системе. Формализован метод принятия управленческих решений по полученным в результате прогонов имитационной модели значениям показателей сбалансированной системы показателей, сочетающий принципы принятия решений в нечетких представлениях (оценка проблемной ситуации) и в структурированных проблемных ситуациях (выдача управленческих решений).

* Статья получена 22 мая 2015 г.

Ключевые слова: ситуационное управление, сбалансированная система показателей, сложная система, имитационная модель, проблемная ситуация, нечеткая информация, управленческие решения, экспертные оценки

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-69-82

ВВЕДЕНИЕ

Подход к управлению на основе сбалансированной системы показателей (ССП) [1] состоит в том, что руководитель выбирает стратегию развития сложной системы (СС) [2]. Из множества разрозненных показателей деятельности СС в соответствии с заданной стратегией формируется множество показателей СПП. На основе множества показателей СПП и фактических данных СС формируется стратегическая карта с выделением показателей, существенно влияющих на конфигурацию системы в рассматриваемой ситуации. На основании представленной информации руководитель формирует управленческие решения, направленные на улучшение существенных показателей в рассматриваемой ситуации. Это требует обработки больших массивов статистической и экспертной информации, проверки множества альтернативных гипотез. Однако в теории стратегического управления на основе СПП отсутствуют средства количественной оценки. Следовательно, создание методических основ управления на основе СПП является актуальной задачей.

В данной работе предлагается метод ситуационного управления сложными системами на основе сбалансированной системы показателей.

1. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Понятие конфигурации сложной системы, исследованное Минцбергом Г. и его коллегами [3], подразумевает устойчивое комплексное ее состояние, соответствующее периоду ее стабильного развития и характеризующее совокупностью различных факторов: стратегией развития и соответствующими показателями, оказываемыми услугами, производимыми продуктами, потребляемыми ресурсами, организационной структурой, применяемыми технологиями, логистическими схемами, методами и моделями, кадровым составом и т. д. В рамках понятия конфигурации функционирование СС представляет собой циклический процесс, который состоит в повторении внутриконфигурационных циклов (*IC*-циклов). *IC*-цикл имеет некую временную протяженность (например, один год, шесть месяцев и т. д.) и состоит из целенаправленных действий – операций p_i , $i = 1, \dots, np$. Для каждой конфигурации (каждого повторения *IC*-цикла) формируется своя система показателей со своей иерархией целей x_i , $i = 1, \dots, nx$. Выполнение операций сопровождается потреблением ресурсов r_i , $i = 1, \dots, nr$ (сырьевых, временных, финансовых, трудовых и т. д.) и вычислением показателей деятельности СС m_i , $i = 1, \dots, nm$. Реализация *IC*-циклов зависит и от воздействия внешней среды – экзогенных факторов v_i , $i = 1, \dots, nv$. В случае отклонения показателей от плановых значений в *IC*-цикле формируется множество управленческих решений y_i , $i = 1, \dots, ny$ для улучшения ситуации. Под ситуацией будем понимать совокупность значений показателей и некоторых произошедших событий.

Проблемная ситуация как некоторое состояние СС возникает при отклонении показателей СПП $M = (m_1, m_2, \dots, m_{nm})$ от базовых (нормативных) значений (запланированных для обеспечения необходимых темпов развития и

стабильного роста и достижения, выбранной стратегии St). Для формализации процесса управления можно описать состояние (исходную конфигурацию) IC_b СС вектором показателей ССП $M = (m_1, m_2, \dots, m_{mn})$. На множестве показателей ССП зададим некоторую оценочную функцию $\Psi_m(M)$, которая позволила бы измерить и оценить вектор показателей ССП $\Psi_m(M) = (\phi(m_1), \phi(m_2), \dots, \phi(m_n))$ [3].

На основании полученных оценок показателей ССП (m_1, m_2, \dots, m_n) можно выявить уровень их отклонения от заданных базовых (нормативных) значений (Δ) , где Δ – величина рассогласования между значениями текущего и базового (нормативного) показателя ССП m_j и m_j^0 , где $\Delta = \phi(m_j) - \phi(m_j^0)$.

И если значение Δ превышает некоторое пороговое значение δ_n или критическое значение $\delta_{кр}$, $(\Delta > \delta_n) \vee (\Delta > \delta_{кр})$, то СС может сойти с траектории управления, ведущей к стратегии St . То есть выполняется правило: в любых конфигурациях IC_j существуют показатели ССП M , отклонение которых от нормативных (базовых) значений в данной конфигурации в некоторый момент времени ведет к повышению порогового или критического значений этих показателей ССП, что диагностируется как проблемная ситуация IC_b . Это описание формально определяется следующим правилом [4]:

$$\exists M \forall IC \left(IC_j \mid (\Delta_j > \delta_n) \vee (\Delta_j > \delta_{кр}) \mid = \phi(m_j) - \phi(m_j^0) \right) \rightarrow IC_0,$$

где IC_b – исходная конфигурация (проблемная ситуация).

Решение проблемной ситуации IC_b определяется как воздействие на существующее состояние множеством влияющих факторов, что ведет к изменению исходного состояния IC_b и переходу из данного состояния к некоторому состоянию IC_{end} (целевому состоянию), соответствующему стратегии деятельности СС St , $Rh : IC_b \rightarrow IC_{end} \mid_{T,I,R}$, при ограничениях на время перехода (изменения исходного состояния) T ; на объем информации, требуемый для осуществления такого перехода I ; на ресурсы управления R для реализации управляющих воздействий на исходную ситуацию через влияющие факторы.

Рациональное решение Rh зависит от следующих параметров [5]:

1) качества и количества различного вида ресурсов управления, выделяемых (имеющихся) для достижения целевого состояния IC_{end} , т. е. $R = \{R^-, R^+\}$, где R^- – постоянные ресурсы управления, т. е. неизменяемые в процессе разрешения проблемы (оборудование СС, кадры, сбытовые сети, сервис и др.); R^+ – переменные ресурсы, т. е. ресурсы, изменяемые в зависимости от объема проблемы, например финансы, инвестиции, материалы, комплектующие, сырье;

2) способа использования ресурсов R ;

3) неуправляемых факторов (инфляции, политической нестабильности, текучести кадров, сбоев оборудования, замены инструментов и др.), определенных и неопределенных факторов (изменения и корректировки производственных планов, изменения норм и нормативов и др.);

4) результатов (исходов – последствий развития принятого решения), к которым могут привести выбранная стратегия и действие неуправляемых факторов;

5) системы предпочтений, показывающих, в какой степени при различных исходах может быть достигнуто целевое состояние IC_{end} .

ЛПР должен [6] оценить значимость отдельных составляющих возникшей ситуации и ситуацию в целом; рассмотреть возможные решения, оценить их последствия и эффективность каждого решения; выбрать решение, наилучшее с его точки зрения.

Структура процедуры управления представлена на рис. 1. После предварительной обработки информации о значениях показателей ССП, поступающей из имитационной модели (ИМ) СС или непосредственно от объекта управления (например, из корпоративной информационной системы СС), в блоке предварительной обработки (БПО), предназначенном для формирования множества *существенных* показателей (показатели значения которых необходимо улучшить) для принятия УР на их основе, информация передается в блок оценки состояний (БОС).

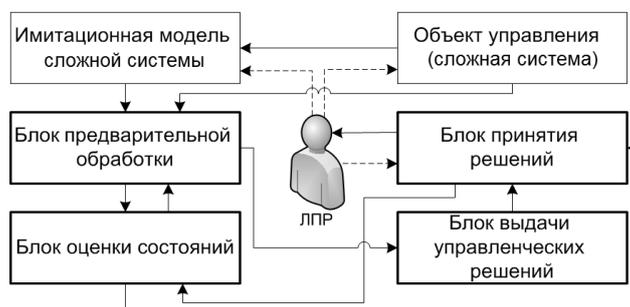


Рис. 1. Структура процедуры управления

В БОС происходит построение формализованного описания ситуации, возникшей на объекте управления. Лингвистические переменные используются для оценки семантики нечетких понятий [7]. Каждому нечеткому понятию, поступающему на вход БОС, ставится в соответствие нечеткое множество на соответствующей предметной шкале, полученное на основе результатов экспертного опроса, или из имеющихся нечетких множеств выполнением некоторых операций, определяемых формой задания нечеткого понятия. Количественная (четкая) информация также отображается в этом блоке в нечеткие множества. Суперпозиция нечетких множеств, полученных в результате идентификации входной информации, представляет собой формализованное описание проблемной (входной) ситуации [8]. Построенная суперпозиция поступает на вход блока принятия решений (БПР), где определяются необходимые управленческие решения. Если сходная ситуация не обнаружена, то управление передается в БПО и далее в блок выдачи управленческих решений (БВУР). В БВУР определяются и ранжируются по критерию Гурвица управленческие решения, направленные на улучшение существенных показателей ССП и формируется множество управленческих решений. Полученное множество передается как входная информация в БПР.

В БПР четкая информация, поступившая из БВУР, проходит процедуры классификации, параметризации и корректировки управленческих решений. Таким образом, формируется информация о ситуации и соответствующих ей УР, которая передается в БОС для пополнения хранилища УР и эталонных ситуаций (ХРС), а также ЛПР для проверки правильности решения на объекте управления (СС) или на имитационной модели. Нечеткая информация, поступающая в БПР из БОС, проходит процедуру перехода от внутренней формы задания управляющих решений к форме, удобной для пользователя, т. е., если это необходимо, решаются задачи лингвистической аппроксимации и

интерпретации. Полученное множество УР также проходит процедуру корректировки и передается ЛПП. Для реализации этих блоков с помощью компьютера необходимо использовать формализованные человеко-машинные процедуры, рассматриваемые далее. Укрупненный алгоритм метода формирования альтернатив представлен на рис. 2.

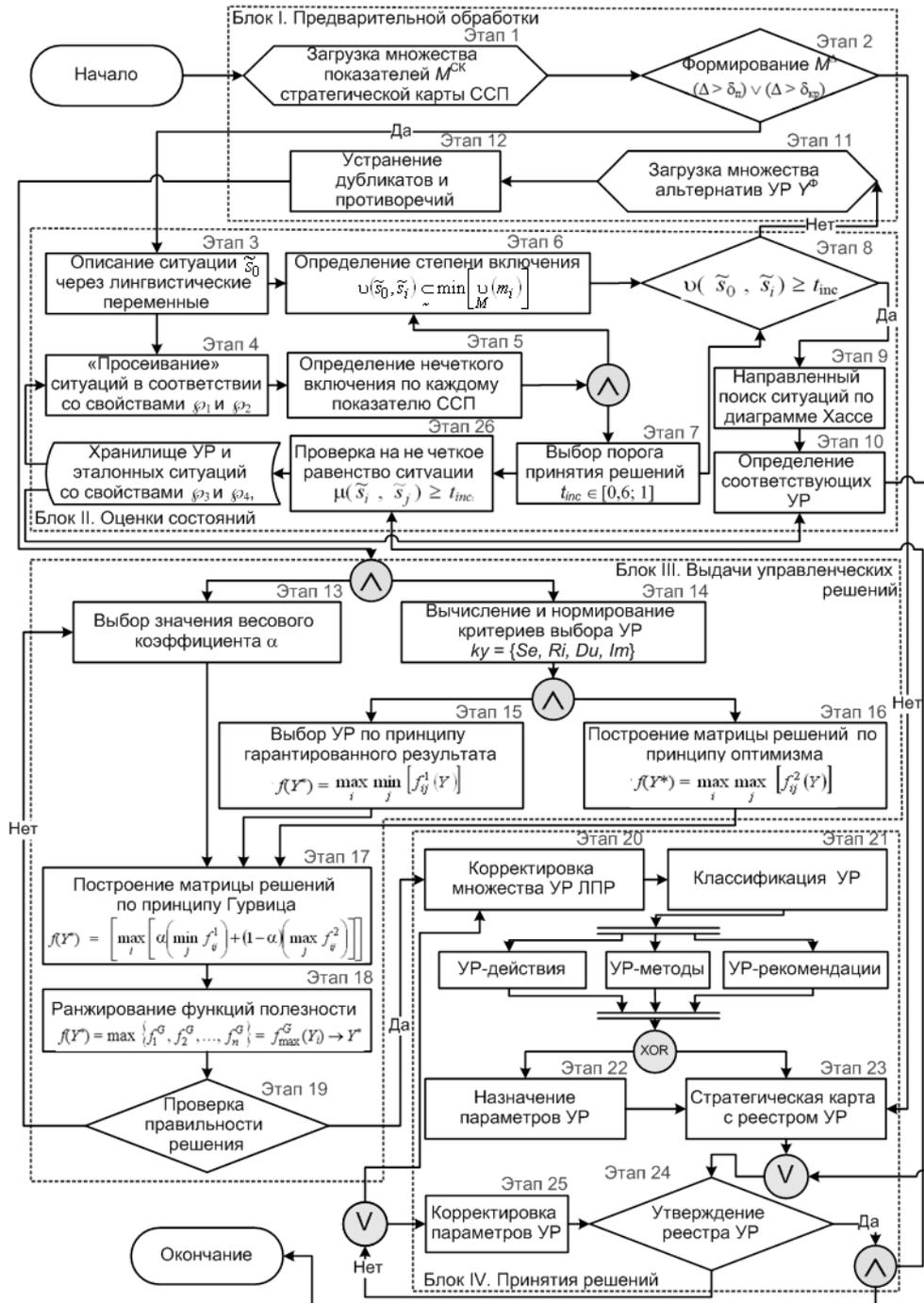


Рис. 2. Алгоритм формирования и выбора УР на основе ССП

2. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ БЛОКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ

Процесс формирования УР начинается с блока *предварительной обработки (БПО)*, в котором осуществляется загрузка значений показателей стратегической карты $M^{СК}$ из результатов прогонов ИМ и происходит формирование множества существенных показателей M^{Δ} , значение Δ которых превышает некоторое пороговое значение $\delta_{п}$ (15 %) или критическое значение $\delta_{кр}$ (30 %). Множество существенных показателей M^{Δ} характеризуют проблемную ситуацию \tilde{s}_0 ССП и передается для формирования стратегической карты.

В ХРС определено, какие УР характеризуются важными связями с целями и показателям ССП. Чтобы избежать повторений при разработке УР, рекомендуется объединять их в содержательно похожие формулировки (независимо от того, к какому показателю они первоначально относились). Соответствующая кодировка УР позволяет определить, для какого показателя ССП определено то или другое УР. Для сопоставления УР и показателей ССП используется матрица, показывающая, достижению какого показателя ССП содействует то или иное УР (табл. 1).

Таблица 1

Матрица показателей ССП и УР

Управленческие решения	Перспектива «Финансы»		Перспектива «Клиенты»			Перспектива «Процессы»					Перспектива «Обучение и развитие»		
	Показатели ССП												
	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9	m_{10}	m_{11}	m_{12}	m_{13}
y_1	✓	✓		✓	✓			✓	✓				
y_2	✓	✓	✓	✓	✓							✓	
...													
y_{ny}	✓		✓				✓			✓	✓		✓

Поскольку УР и показатели ССП находятся в отношении «многие ко многим», то существует вероятность дубликатов – одинаковых записей в формируемом множестве альтернатив УР. Дубликаты вызывают избыточность данных, увеличивают объем выборки УР, при этом совершенно не повышают информативность данных. Из всех дублирующих друг друга УР оставляют только одно, а остальные удаляют. Для оставленного УР воспользуемся методом *непосредственной (аналитической) оценки* [5] для нормирования признака чувствительности Se для каждого управленческого решения (табл. 2).

Таблица 2

Таблица рангов Ra для измерения Se чувствительности

Ранги, Ra	Оценки Se ($Ra = 5$)	Оценки Se ($Ra = 4$)	Оценки Se ($Ra = 3$)	Оценки Se ($Ra = 2$)
1	1	1	1	1
2	0,75	0,67	0,5	0
3	0,5	0,33	0	
4	0,25	0		
5	0			

Для каждого управленческого решения в формируемом множестве добавляется признак количества дубликатов Du (признак перспективности). Далее необходимо выявить противоречивые УР в соответствии с матрицей противоречий (табл. 3).

Таблица 3

Матрица противоречий УР

УР	y_1	y_2	...	y_n
y_1	–	✓		✓
y_2		–		✓
...		✓	–	
y_{ny}	✓			–

Если в паре УР выявлено противоречие, то в множестве УР остается УР с более высоким признаком чувствительности Se , т. е. с более высокой степенью влияния на ситуацию. Если выяснилось, что одно УР, например y_1 , противоречит двум или более УР, то удаляется из списка УР y_1 . В результате сформировано множество альтернатив УР $Y^\Phi = (y_1^\Phi, y_2^\Phi, \dots, y_{ny}^\Phi)$, прошедшее проверку на наличие дубликатов и противоречий.

3. БЛОК ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЙ

Для продолжения процесса формирования и выбора УР осуществляется переход в блок оценки состояний (БОС), работа которого построена на ситуационной модели. По мере прогонов ИМ накапливается информация о проблемных ситуациях (в виде множества значений показателей ССП из разнообразных стратегических карт ССП, отличающихся по количеству и составу показателей) и сформированных УР для улучшения ситуаций. Важной задачей становится классификация типовых ситуаций, их хранения и выдача ЛПР для класса распознанной группы проблемных ситуаций, рассматриваемых ранее, а также зарекомендовавших себя альтернатив УР.

Для решения задачи оценки состояний нами был выбран аппарат нечеткой логики. Нечеткая логика используется здесь для формализации нечетких понятий и обеспечивает эффективную обработку качественной информации наравне с четкими количественными данными. Более того, использование нечеткой логики при оценке сложившихся ситуаций и построении логических заключений в моделях управления сложными объектами облегчает решение задач обеспечения общения с пользователем на профессионально ориентированном языке, хранения, накопления и обработки качественной информации [8]. Описание проблемной ситуации \tilde{s}_0, M^A которой характеризуется значениями лингвистической переменной $T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_j^i\}$, осуществляется как нечеткое множество второго уровня $\tilde{s} = \{ \langle \mu_s(m_i) / m_i \rangle \}$, $m_i \in M$, где $\mu_s(m_i)$ – функция принадлежности, $\mu_s(m_i) = \left\{ \left\langle \mu_{\mu_s(m_i)}(T_j^i) / T_j^i \right\rangle \right\}$, $j \in L, i \in J$.

Для отбора из множества ситуаций БОС ситуаций, наиболее близких \tilde{s}_0 , необходимо решить задачу пересчета [9]. Принцип метода пересчета, который можно назвать «методом просеивания» или «комбинаторным просеиванием», прост: с любым свойством \wp можно связать его расщепление на некотором множестве A , в соответствии с которым A разбивается на две части: подмножество A_1 , образованное элементами, обладающими свойством \wp , и A_2 , образованное элементами, не обладающими свойством \wp , т. е. обладающими свойством $\bar{\wp}$. Выбирая свойства подходящим образом, можно последовательным просеиванием пересчитать подмножества с наложенными на них теми или иными ограничениями.

«Просеивание» ситуаций хранилища УР и эталонных (типовых) ситуаций (ХРС) осуществляется в соответствии со свойствами:

$$\begin{aligned} \wp_1 : \bar{M}_1^{s_i} &= \bar{M}_1^{s_0}; \\ \wp_2 : \text{Card } \bar{M}_1^{s_i} &= \{0, 1\} \text{ и } \text{Card } \bar{M}_1^{s_0} = \{0, 1\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где M^{s_0} – множество показателей проблемной ситуации \tilde{s}_0 и $M_1^{s_0} \subset M^{s_0}$, $\bar{M}_1^{s_0}$ дополнение $M_1^{s_0}$ по отношению к M^{s_0} , $\text{Card } M^{s_0}$ – число элементов в M^{s_0} . Свойства \wp_1 и \wp_2 обеспечивают отбор из ХРС множества типовых ситуаций \tilde{S}_i с наборами существенных показателей, наиболее близкими к проблемной ситуации \tilde{s}_0 по наименованию и количеству существенных показателей. Множество типовых ситуаций в ХРС не содержит плохо определенных ситуаций и повторяющихся ситуаций, т. е. обладает свойствами \wp_3 и \wp_4 :

$$\begin{aligned} \wp_3 : \left(\exists T_q^k \in T_k \right) \left(\mu_{\mu_S}(m_k) \left(T_q^k \right) \right) &\in (1 - t_{inc}, t_{inc}) \\ \wp_4 : \left(\forall \tilde{s}_i, \tilde{s}_j \in S \right) \left(\left(i \neq j \wedge \tilde{s}_i \subset \tilde{s}_j \right) \right. &\rightarrow \left. \left(\tilde{s}_i \not\subset \tilde{s}_j \right) \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Определение нечеткого включения (степени близости) ситуации \tilde{s}_0 в множество типовых ситуаций \tilde{S}_i для каждой ситуации \tilde{s}_i осуществляется по каждому показателю ССП m_i :

$$\begin{aligned} v(m_i) &= v(\mu_{s_0}(m), \mu_{s_i}(m)) = \bigwedge_{m \in M} v(\mu_{s_0}(m) \rightarrow \mu_{s_i}(m)) = \\ &= \min_m \left[\max_{\beta \in T} (1 - \beta_{0i}(t_k); \beta_{0i}(t_k)) \right], \end{aligned}$$

где $V(T) = \{\beta_1(t_1), \beta_2(t_2), \dots, \beta_m(t_m)\}$ – множество $t \in T$.

Определение $v(\tilde{s}_0, \tilde{s}_i) \subset \min_M \left[v(m_i) \right]$ проводится для каждой ситуации из множества \tilde{S}_i . Одновременно ЛППР определяется со значением $t_{inc} \in [0,6; 1]$

для обеспечения необходимой достоверности решений при управлении. Выявление множества типовых ситуаций \tilde{S}_i , сходных с проблемной ситуацией \tilde{s}_0 , осуществляется по правилу $v(\tilde{s}_0, \tilde{s}_i) \geq t_{inc}$. Если сходные типовые ситуации обнаружены в ХРС, то организуются иерархии на множестве \tilde{S}_i и строится диаграмма Хассе для осуществления направленного поиска ситуации \tilde{s}_i , наиболее сходной с проблемной ситуацией \tilde{s}_0 . Из ХРС для найденной наиболее сходной ситуации выдается реестр соответствующих ей альтернатив УР [10]. Реестр альтернатив УР, найденных по решающей таблице из ХРС для наиболее сходной входной нечеткой ситуации, передается в блок *принятия решений (БПР)* для утверждения и корректировки (рис. 2).

Если проблемная ситуация не ассоциируется с типовыми ситуациями ХРС, инициализируется БПО и запускаются алгоритмы дальнейшей предварительной обработки и выдачи (формирования) УР для проблемной ситуации \tilde{s}_0 . Формирование множества УР (влияющих факторов) Y^{Φ} , приводящих к изменению исходного состояния конфигурации СС IC_b , происходит в соответствии с матрицей противоречий УР по множеству существенных показателей M^{Δ} . В результате формируется множество УР Y^{Φ} , устранение дубликатов и противоречий в котором осуществляется в соответствии с матрицей противоречий (табл. 3).

4. ПРОЦЕДУРА ВЫДАЧИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

В блоке *выдачи управленческих решений (БВУР)* ЛПР выбирает значения весового коэффициента α , определяющего различные принципы выбора альтернатив УР. Одновременно происходит вычисление и нормирование критериев выбора УР.

1. Чувствительность (Se) показателя m_i к УР y_i определяется как среднее значение всех оценок по формуле $Se_{yi} = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^{nm} se_i$, где nm – количество показателей, на улучшение которых направлено управленческое решение y_i .

2. Риск (Ri) УР y_i определяется по показателю m_i по формуле $Ri = \sum_{i=1}^{n_{ex}} \left(\frac{mf}{n_{ex}} mr \right)$, где mf – количество благоприятных исходов после прогона

имитационной модели для m_i ; n_{ex} – количество проведенных экспериментов; mr – плановое или базовое значение показателя m_i по результатам прогонов имитационной модели. Риски определяются как среднее значение всех оценок по формуле $Ri_{yi} = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^{nm} ri_i$.

3. Перспективность (Du) УР определяется частотой его появления по формуле $Du = \frac{Ndu}{Nm}$, где Ndu – количество дубликатов УР в формируемом множестве; Nm – количество показателей в ССП.

4. Значимость (Im) УР определяется в соответствии с табл. 4. Значимость для множества УР Y^{Φ} также определяется в соответствии с табл. 4.

Таблица 4

Определение значимости Im УР

Величина рассогласования между значениями текущего и базово- го (нормативного) показателя ССП	Количество показателей				
	0 (минималь- ная значи- мость)	0,25 (небольшая значимость)	0,5 (средняя значимость)	0,75 (существен- ная значи- мость)	1 (высокая значи- мость)
$\Delta > \delta_{кр}$	нет	нет	1	2	3 и более
$\delta_{кр} > \Delta > \delta_{п}$	1	не больше 2	не больше 2	не больше 2	не важно

Элементы вектора критериев для выбора УР $ky = \{Se, Ri, Du, Im\}$ характеризуют заданное УР из множества альтернатив УР $Y^{\Phi} = \langle Se, Ri, Du, Im \rangle$.

В БВУР формируются матрицы решений по принципам гарантированного результата и оптимизма. Матрица решений формируется по принципу Гурвица, и осуществляется ранжирование среди вычисленных по второй части решающего правила Гурвица $\left[\alpha \left(\min f_{ij}^1 \right) + (1 - \alpha) \left(\max f_{ij}^2 \right) \right] = f^G(Y_i)$ значений $\{f_1^G, f_2^G, \dots, f_n^G\}$ функции полезности по решающему правилу $f(Y^*) = \max \{f_1^G, f_2^G, \dots, f_n^G\} = f_{\max}^G(Y_i) \rightarrow Y^*$. Проверка правильности полученного решения осуществляется путем выбора различных значений параметра α и построения итоговой таблицы. Если решение не удовлетворяет условиям, то управление возвращается к этапу выбора значения весового коэффициента α (рис. 2).

5. ПРОЦЕДУРА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Функционирование БПР начинается с корректировки ЛПР состава множества альтернатив УР путем удаления/добавления УР в сформированное множество альтернатив. Полученное множество УР подвергается процедуре классификации.

УР-действия (с параметрами). Такие управленческие решения реализуются на имитационной модели в виде изменения конкретных параметров, например количества ресурсов [11]. Нами предлагается значения этих параметров выбирать в зависимости от значимости УР. Класс 1 (значимость минимальная и небольшая) означает самую слабую степень влияния на ситуацию, $Im = \{0; 0,25\}$, класс 2 (значимость средняя) – среднюю степень, $Im = \{0,5\}$, класс 3 (значимость существенная и высокая) – сильную степень влияния, $Im = \{0,75; 1\}$.

УР-методы (класс 4). Например, «Метод анализа использования основных фондов на основе комплексной экономико-математической модели» [12], «Метод повышения качества логистического обслуживания» [13], «Функционально-стоимостной анализ» [14], «Размещение грузов на складе по методу ABC» и др. Проверить эффективность таких методов возможно на имитационной модели.

УР-рекомендации (без параметров). Например, «Внедрить новые информационные технологии», «Улучшить условия работы сотрудников» и др.

Проверить эффективность внедрения таких УР не всегда возможно на имитационной модели напрямую [15]. Можно лишь изменить некоторые параметры ИМ по усмотрению ЛПР косвенно. Например, для проверки эффективности УР «Внедрить новые информационные технологии» можно изменять параметры модели, связанные со скоростью обработки груза и т. п.

Поэтому после корректировки множества УР ЛПР и необходима процедура классификации УР, позволяющая назначить количественные параметры УР-действий, а также составить план эксперимента (сценарий) с помощью модуля Process Analyzer с имитационной моделью в рамках предложенного метода. После этого ЛПР имеет возможность корректировки вручную количественных параметров УР-действий. В случае если ЛПР устраивают полученные результаты, формируется реестр УР; в другом случае возможна корректировка либо состава УР, либо количественных параметров УР. На рис. 3 представлена детальная схема выдачи УР на основании четкой информации.

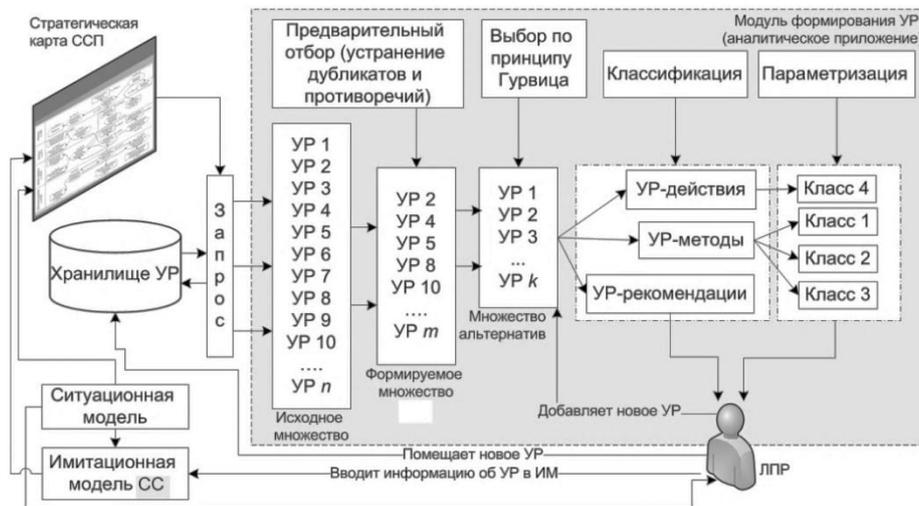


Рис. 3. Детальная схема выдачи УР по четкой информации из БВУР

Далее происходит формирование стратегической карты с реестром УР, а также утверждение ЛПР реестра альтернатив УР с параметрами и в случае необходимости – корректировка параметров УР по усмотрению ЛПР.

В заключение осуществляется проверка новой проблемной ситуации на нечеткое равенство $\mu(\tilde{s}_i, \tilde{s}_j) = \cup(\tilde{s}_i, \tilde{s}_j) \wedge \cup(\tilde{s}_j, \tilde{s}_i)$ и пополнение ХРС информацией о новой нечеткой ситуации и соответствующих ей альтернативах УР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен укрупненный алгоритм метода формирования альтернатив управленческих решений (рис. 2). Формализован метод принятия управленческих решений по полученным в результате прогонов имитационной модели сложной системы значениям показателей ССП, сочетающий принципы принятия решений в нечетких представлениях (оценка проблемной ситуации) и в структурированных проблемных ситуациях (выдача УР), что позволяет перейти к реализации этой процедуры в виде систем поддержки принятия управленческих решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ханова А.А. Структурно-функциональная модель сбалансированной системы показателей для принятия управленческих решений // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2012. – № 1. – С. 200–208.
2. Shcherbatov I.A. Classification of pure formalized complex multicomponent technical systems under conditions of uncertainty // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2012. – № 2. – С. 9–12.
3. Ханова А.А., Хортонен А.С., Парамзина Л.В. Системные взаимосвязи стратегического управления и моделирования социально-экономических систем на основе сбалансированной системы показателей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2014. – № 2. – С. 109–116.
4. Минцберг Г., Альстрэнд Б., Лэмпель Дж. Школы стратегий. Стратегическое сафари: экскурсия по дебрям стратегий менеджмента: пер. с англ. / под ред. Ю.Н. Каптуревского. – СПб.: Питер, 2000. – 336 с.
5. Афоничкин А.И., Михаленко Д.Г. Управленческие решения в экономических системах: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2009. – 480 с.
6. Трахтенгерц Э.А., Степин Ю.П. Методы компьютерной поддержки формирования целей и стратегий в нефтегазовой промышленности. – М.: СИНТЕГ, 2007. – 244 с.
7. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
8. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
9. Кофман А. Введение в прикладную комбинаторику. – М.: Наука, 1975. – 480 с.
10. Мельников Б.Ф., Радионов А.Н. О выборе стратегии в недетерминированных антагонистических играх // Программирование. – 1998. – № 5. – С. 55–62.
11. Проталинский О.М., Ханова А.А., Бондарева И.О. Имитационная модель технологических процессов грузового порта // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – № 4 (50), вып. 2. – С. 134–144.
12. Ханова А.А., Ганюкова Н.П. Совершенствование метода анализа основных фондов предприятия на основе имитационного моделирования // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318, № 6. – С. 5–10.
13. Ханова А.А., Григорьев О.В., Бондарева И.О. Параметрический анализ качества логистического обслуживания в грузовом порту // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2010. – № 2. – С. 61–68.
14. Ханова А.А., Пономарева А.С. Управление затратами грузового порта на основе функционально-стоимостного анализа // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2011. – № 3 (161). – С. 116–119.
15. Немчинов Д.В., Проталинский О.М. Система принятия управленческих решений по снижению влияния субъективного фактора как причины аварийной ситуации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2011. – № 2. – С. 43–48.

Ханова Анна Алексеевна, доктор технических наук, профессор Астраханского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – теория управления, принятия решений и обработка информации. Имеет более 150 публикаций. E-mail: akhanova@mail.ru

Уразалиев Нурлан Саламатович, аспирант Астраханского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – принятие решений. Имеет 3 публикации. E-mail: nastya5288@mail.ru

Усманова Злата Артуровна, аспирант Астраханского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – методы управления. Имеет 4 публикации. E-mail: mariadontdisturb@mail.ru

The method of situational control of complex systems based on the balanced scorecard*

A.A. KHANOVA¹, N.S. URASALIEV², Z.A. USMANOVA³

¹Astrakhan State Technical University, 16, Tatischev Street, Astrakhan, 414056, Russian Federation, D.Sc. (Eng.), professor. E-mail: akhanova@mail.ru

²Astrakhan State Technical University, 16, Tatischev Street, Astrakhan, 414056, Russian Federation, postgraduate student. E-mail: urazaliev.n.s@mail.ru

³Astrakhan State Technical University, 16, Tatischev Street, Astrakhan, 414056, Russian Federation, postgraduate student. E-mail: slataarturovna@gmail.com

This work describes a method for the formation and selection of alternative management decisions including the definition of the problem situation based on a set of indicators of the balanced scorecard and the presence or absence of similar situations in many typical situations. A management procedure structure including pre-processing, state estimation, management decision issuing and decision making is formalized. The structure of the pre-processing unit including load operation indicators of the balanced scorecard, the emergence of many of the major indicators, downloading appropriate significant indicators of a multitude of management decisions into the final lookup table, eliminating duplicates and contradictions among many management decisions. The description of the procedure for forming and issuing management decisions on the Gurwitz principle is presented. Selection criteria of management solutions are defined and utility functions are ranked. An approach to the analysis and evaluation of a fuzzy situation in the complex system based on the deviation of the indicators values of the balanced scorecard from the norm by describing the situation using linguistic variables is proposed. Given a variety of situation structures defined by strategic maps and balanced scorecards for each configuration of a complex system, using a situation sieve procedure is proposed before looking for a situation similar to the problem situation. A situation model is constructed. The procedure of issuing managerial decisions involving the adjustment of a multitude of management decisions by the structure and parameters as well as the classification and parametrization of managerial decisions are described. The classes of managerial decisions for the proposed procedure of decision making on the basis of the simulation model are defined. The method of managerial decision formation and selection combining crisp and fuzzy information about systems is proposed. The method of making management decisions based on the results of simulation model runs with regard to values of the indicators of the balanced scorecard that combines the principles of decision making in fuzzy representations (evaluation problem) and in structured problem situations (issuance of administrative decisions) is formalized.

Keywords: situational management, balanced scorecard, complex system, simulation model, problem situation, fuzzy information, management decisions, expert evaluation

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-69-82

REFERENCES

1. Khanova A.A. Strukturno-funktsional'naya model' sbalansirovannoi sistemy pokazatelei dlya prinyatiya upravlencheskikh reshenii [Structurally functional model of the balanced scorecard for adoption of administrative decisions]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: Management, computer science and informatics*, 2012, no. 1, pp. 200–208.
2. Shcherbatov I.A. Classification of pure formalized complex multicomponent technical systems under conditions of uncertainty. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: Management, computer science and informatics*, 2012, no. 2, pp. 9–12.

* Received 22 May 2015.

3. Khanova A.A., Khortonen A.S., Paramzina L.V. Sistemnye vzaimosvyazi strategicheskogo upravleniya i modeli-rovaniya sotsial'no-ekonomicheskikh sistem na osnove sbalansirovannoi sistemy pokazatelei [System of relationship strategic management and modeling socio-economic systems based on the balanced scorecard]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: Management, computer science and informatics*, 2014, no. 2, pp. 109–116.
4. Mintzberg H., Ahlstrand B., Lampel J. *Strategy safari: A guided tour through the wilds of strategic management*. New York, The Free Press, 1998. 406 p. (Russ. ed.: Mintsberg G., Al'stred B., Lempel' Dzh. *Shkoly strategii. Strategicheskoe safari: ekskursiya po debryam strategii menedzhmenta*. Translated from English Yu.N. Kapturevskii. St. Petersburg, Piter Publ., 2000. 336 p.).
5. Afonichkin A.I., Mikhaleiko D.G. *Upravlencheskie resheniya v ekonomicheskikh sistemakh* [Management decisions in economic systems]. St. Petersburg, Piter Publ., 2009. 480 p.
6. Trakhtengerts E.A., Stepin Y.P. *Metody kompyuternoi podderzhki formirovaniya tselei i strategii v neftegazovoi promyshlennosti* [Computer methods support the development of objectives and strategies in the oil and gas industry]. Moscow, SINTEG Publ., 2007. 244 p.
7. Zade L. *Ponyatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennykh reshenii* [The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning]. Moscow, Mir Publ., 1976. 165 p.
8. Melikhov A.N., Bershtein L.S., Korovin S.Ya. *Situatsionnye sovetuyushchie sistemy s nechetkoi logikoi* [Situational advising systems with fuzzy logic]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 272 p.
9. Kofman A. *Vvedenie v prikladnyu kombinatoriku* [Introduction to applied combinatorics]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 480 p.
10. Mel'nikov B.F., Radionov A.N. O vybore strategii v nedeterminirovannykh antagonisticheskikh igrakh [The choice of strategy in a non-deterministic antagonistic games]. *Programmirovanie – Programming and Computer Software*, 1998, no. 5, pp. 55–62.
11. Protalinskii O.M., Khanova A.A., Bondareva I.O. Imitatsionnaya model' tekhnologicheskikh protsessov gruzovogo porta [Simulation model of technological processes of cargo port]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Saratov state technical University*, 2010, vol. 4, no. 2 (50), pp. 134–144.
12. Khanova A.A., Ganyukova N.P. Sovershenstvovanie metoda analiza osnovnykh fondov predpriyatiya na osnove imitatsionnogo modelirovaniya [Improvement of the method of analysis of fixed assets on the basis of simulation]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 6, pp. 5–10.
13. Khanova A.A., Grigor'ev O.V., Bondareva I.O. Parametricheskii analiz kachestva logisticheskogo obsluzhivaniya v gruzovom portu [Parametric analysis of the quality of logistics services at the cargo port]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: Management, computer science and informatics*, 2010, no. 2, pp. 61–68.
14. Khanova A.A., Ponomareva A.S. Upravlenie zatratami gruzovogo porta na osnove funktsional'no-stoimostnogo analiza [Cost Control cargo port on the basis of functional cost analysis]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Tekhnicheskie nauki – North Kavkaz High School Research. Series: Technical Sciences*, 2011, vol. 3 (161), pp. 116–119.
15. Nemchinov D.V., Protalinskii O.M. Sistema prinyatiya upravlencheskikh reshenii po snizheniyu vliyaniya sub"ektivnogo faktora kak prichiny avariinnoi situatsii [System management decisions to reduce the impact of subjective factors as causes of emergency]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: Management, computer science and informatics*, 2011, no. 2, pp. 43–48.

УДК 519.24

О модели случайного блуждания на ковре Серпинского*

Н.С. АРКАШОВ¹, Е.В. ЛЕЖНЕВ²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой высшей математики Новосибирского государственного технического университета. E-mail: nicky1978@mail.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики Новосибирского государственного технического университета. E-mail: lionlev@yandex.ru

В статье разработаны и численно реализованы две модели случайного блуждания на самоподобном подмножестве плоскости, которое можно рассматривать как ковер Серпинского, развернутый на всю плоскость. Такое множество будем называть ковром Серпинского в целом. Построенные модели случайного блуждания позволили решить две задачи: вычислить средние квадраты соответствующих случайных процессов и исследовать асимптотику вероятности возвращения в начальную точку блуждания. Размерность геодезических ковра Серпинского в целом и кривых, по которым происходит случайное блуждание, равна единице, между тем размерность ковра Серпинского имеет дробное значение. Мы следовали формату случайного блуждания по самоподобному множеству, приведенному в работе [1]. В этом формате средний квадрат случайного блуждания связан с хаусдорфовой размерностью аналогов геодезических, а вероятность возвращения – с отношением размерности фазового пространства к размерности этих геодезических. Сформулируем полученные нами результаты для ковра Серпинского в целом более точно: средний квадрат блуждания ведет себя линейно по времени, вероятность возвращения в начало координат за определенное число шагов заключена между значениями классической вероятности возвращения симметричного случайного блуждания на плоскости и на прямой. Еще раз отметим, что число степеней свободы, определяемое как отношение размерности фазового пространства к размерности геодезических, имеет для ковра Серпинского дробный характер числа степеней свободы. Действительно, из-за неоднородной структуры ковра Серпинского у блуждающей точки число возможных направлений движения не является постоянной величиной и изменяется с течением времени.

Ключевые слова: процессы переноса, стохастическое моделирование, диффузия, ковер Серпинского, случайное блуждание, цепь Маркова, самоподобные множества, вероятность возвращения

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-83-93

* Статья получена 26 мая 2015 г.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 13-01-00661)

ВВЕДЕНИЕ И ФОРМУЛИРОВКА ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В основе работ, посвященных процессам переноса на самоподобных структурах (см., например, [1–6]), лежит случайное блуждание на множествах, представляющих эти структуры. Мы рассматриваем такие реализации самоподобных структур, для которых минимальная размерность Хаусдорфа всех путей, соединяющих любые две точки этого множества, одна и та же. На множестве с подобной структурой через d_f обозначим размерность Хаусдорфа этого множества, а через d_0 – минимальную размерность Хаусдорфа всех путей, соединяющих две какие-нибудь точки на этом множестве. Сформулируем условия, которые в целом ряде прикладных работ предполагаются выполненными для частицы, блуждающей по самоподобному множеству. Средний квадрат расстояния от частицы, совершающей блуждание, до начала координат в момент времени t (называемый физиками шириной диффузионного пакета) ведет себя пропорционально t^{1/d_0} при $t \rightarrow \infty$, а вероятность возвращения частицы в начало координат в момент времени t ведет себя пропорционально $t^{-k/2}$ при $t \rightarrow \infty$, где $k = d_f / d_0$.

Повторим, что указанные условия получены в работе [1] исходя из некоторых эвристических соображений. В обозначенной работе, а также в работах [4, 7] ставился вопрос об обосновании представленных моделей процессов переноса.

Отметим также, что ковер Серпинского можно интерпретировать как пористую среду с сетью межзерновых связанных каналов (см., например, исследования [8–10]).

В настоящей работе мы строим математические модели случайного блуждания на конкретном самоподобном множестве, реализующие условие изменения среднего квадрата блуждающей частицы в зависимости от размерности геодезических; кроме того, с помощью численного моделирования исследуется асимптотика вероятности возвращения в начало координат. Отметим, что для нашего случая фазового пространства $d_0 = 1$ и $d_f = \ln 8 / \ln 3$, где d_f – известная хаусдорфова размерность ковра Серпинского (см., например, работы [11–13]), и соответственно предполагается, что вероятность p_t возвращения в начало координат за время t ведет себя как $t^{-\ln 8 / \ln 9}$ при $t \rightarrow \infty$.

Итак, фазовым пространством случайного блуждания будет целочисленная решетка в \mathbb{R}^2 , построенная на основе ковра Серпинского – известного двумерного самоподобного множества.

Прежде всего напомним определение ковра Серпинского. Пусть S_0 – квадрат с вершинами в точках $(0, 0)$, $(1, 1)$, $(-1, 1)$, $(0, 2)$. Разделим квадрат прямыми, параллельными его сторонам, на девять равных квадратов, далее из квадрата S_0 удалим внутренность центрального квадрата. Получается множество S_1 , состоящее из восьми оставшихся квадратов первого ранга. Поступая аналогичным образом с каждым из квадратов первого ранга, полу-

чаем 64 квадрата второго ранга. Продолжая указанный процесс до бесконечности, получим последовательность вложенных множеств

$$S_0 \supset S_1 \supset S_2 \supset \dots$$

Пересечение $\bigcap_{i=0}^{\infty} S_i$ и является ковром Серпинского, будем его обозначать через K_0 .

Сделаем важное замечание, которое лежит в основе построения фазового пространства блуждания: стороны начального квадрата, а также стороны квадратов всех рангов принадлежат коврику Серпинского.

Определим растягивающее преобразование подобия с коэффициентом 3: $\rho(x) = 3x$ для всех $x \in \mathbb{R}^2$. Далее рассмотрим последовательность множеств $K_0 \subset \rho(K_0) \subset \rho^2(K_0) \subset \dots$ и отметим, что $\rho^n(K_0)$ (ρ^n – n -кратная композиция преобразования ρ) является ковром Серпинского, построенным по начальному квадрату со стороной 3^n . Через K обозначим объединение $\bigcup_{i=0}^{\infty} \rho^i(K_0)$. Отметим, что диаметр множества K равен $+\infty$.

Отобразим множество K симметрично относительно прямых $y = -x$, $y = x$ и начала координат, результат отображения обозначим через K_l , K_r и K_d соответственно. Следующее объединение: $K \cup K_r \cup K_l \cup K_d$ мы будем называть ковром Серпинского в целом. Всюду в дальнейшем будем рассматривать множество $S = (K \cup K_r \cup K_l \cup K_d) \cap \mathbb{Z}^2$, которое является *фазовым пространством* нашего блуждания. Особыми точками на S будем называть точки, лежащие на сторонах удаленных квадратов за исключением вершин этих квадратов.

1. СИММЕТРИЧНОЕ СЛУЧАЙНОЕ БЛУЖДЕНИЕ

Перейдем теперь к определению случайного блуждания. Пусть $\{\xi_i\}_{i=1}^{\infty}$ и $\{\eta_i\}_{i=1}^{\infty}$ – две независимые друг от друга последовательности независимых радемахеровских случайных величин (т. е. $P(\xi_1 = -1) = P(\xi_1 = 1) = 1/2$). Отметим, что процесс $S_0 = (0, 0)$, $S_t = \sum_{i=1}^t (\xi_i, \eta_i)$, $t \geq 1$ является обычным классическим случайным блужданием на двумерной целочисленной решетке.

Определим симметричное случайное блуждание Z_t , $t \geq 0$ на S . Положим $Z_0 = (0, 0)$, далее если Z_t не является особой точкой, то $Z_{t+1} = Z_t + (\xi_{t+1}, \eta_{t+1})$. Если Z_t является особой точкой, при этом соответствующая сторона удаленного квадрата составляет угол $\pi/4$ с осью абсцисс, то $Z_{t+1} = Z_t + (\xi_{t+1}, \xi_{t+1})$; если же обозначенная сторона составляет $3\pi/4$ с осью абсцисс, то $Z_{t+1} = Z_t + (\xi_{t+1}, -\xi_{t+1})$ (рис. 1). Очевидно, что Z_t , $t \geq 0$, является однородной по времени и неоднородной по пространству цепью Маркова.

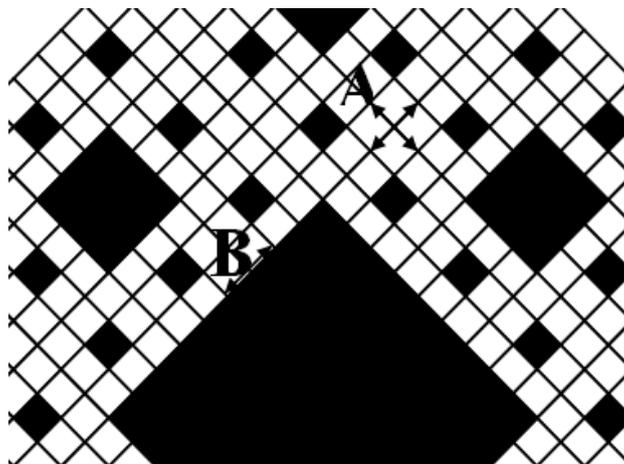


Рис. 1. В положении (А) частица может двигаться по четырем направлениям, в положении (В) – только по двум направлениям

Пусть $Z_t = (Z_{t,1}, Z_{t,2})$. Следующая теорема показывает, как изменяется средний квадрат расстояния от Z_t до начала координат с ростом t .

Теорема 1. Для любого $t \geq 1$ имеет место равенство

$$E(Z_{t,1}^2 + Z_{t,2}^2) = 2t.$$

Из теоремы 1 следует, что средний квадрат блуждания растет линейно со временем, т. е. блуждание соответствует классическому диффузионному типу.

2. СЛУЧАЙНОЕ БЛУЖДЕНИЕ С РАВНОМЕРНЫМ ВЫБОРОМ НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ

Определим несколько отличающееся от предыдущего случайное блуждание W_t . Будем считать, что $W_0 = (0, 0)$, и далее, на каждом шаге блуждающая точка сдвигается с равной вероятностью в одном из всех возможных направлений движения независимо от того, что было на предыдущем шаге. Если блуждающая точка в некоторый момент времени является особой, то у нее возникают три возможных направления движения, в противном случае – четыре (рис. 2). Отметим, что блуждающая точка с вероятностью $1/3$ «отскакивает» от границы удаленного квадрата, в отличие от предыдущего случайного блуждания, где точка может только «сползать» вдоль границы удаленного квадрата.

Пусть $W_t = (W_{t,1}, W_{t,2})$. Отметим, что численное моделирование показывает, что

$$1,6 \leq E(W_{t,1}^2 + W_{t,2}^2) / t \leq 2$$

при всех $t \geq 1$.

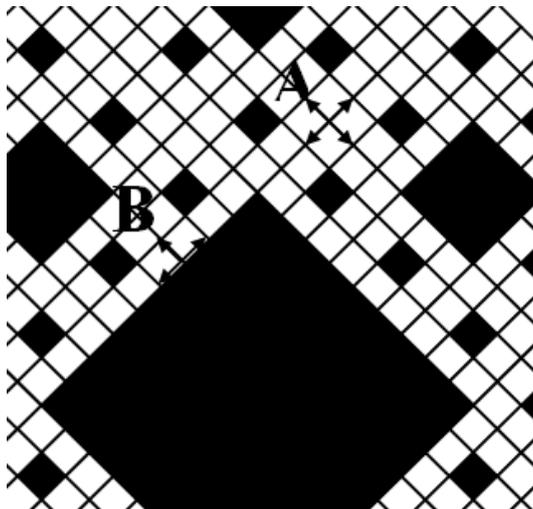


Рис. 2. В положении (А) частица может двигаться по четырем направлениям, в положении (В) – по трем направлениям

Это означает, что и в этом случае средний квадрат расстояния от блуждающей точки до начала координат ведет себя линейно по времени.

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗВРАЩЕНИЯ

Для численного моделирования удобнее использовать несколько иную сетку, по которой происходит блуждание, нежели представленную выше. Повернем определенную выше сетку на угол $\pi/4$ по часовой стрелке и сожмем в $\sqrt{2}$ раз. В итоге точка при блуждании будет сдвигаться на каждом шаге по отрезку единичной длины, перпендикулярному или параллельному оси абсцисс. Очевидно, что после такого преобразования сетки вероятность возвращения в ноль не изменится.

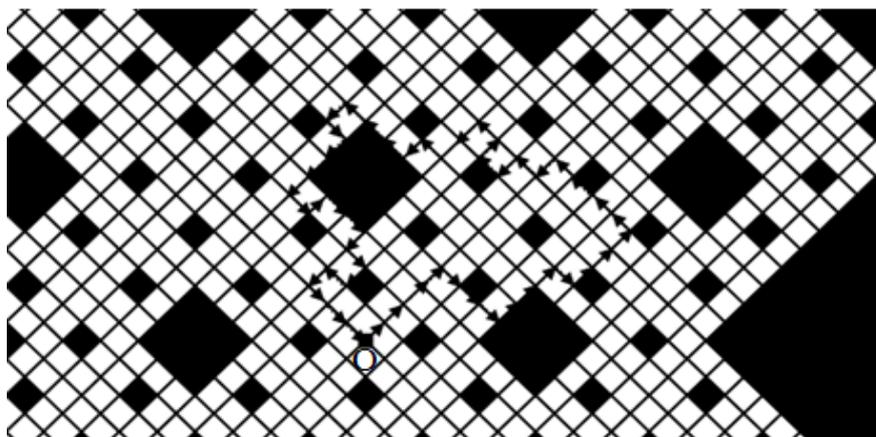


Рис. 3. Пример блуждания частицы и возвращения в начало координат

Рассматриваем $n_p = 10^9$ частиц, каждая из которых независимо от других блуждает время t , после чего фиксируем, попала ли частица в начало координат или нет. Пример блуждания частицы приведен на рис. 3. Отношение числа случаев попадания в начало координат к $n_p = 10^9$ дает нам оценку p_t^* вероятности возвращения в начало координат p_t за время t . Мы вычисляем p_t^* для времени t от 20 до 300 с шагом 2. Предполагается, что

$$p_t = \frac{c}{t^\gamma} (1 + \eta_t), \quad (1)$$

где c и γ – неизвестные константы, а $\eta_t \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. Выбор t в диапазоне от 20 до 300 связан с тем, с одной стороны, t не может быть сколь угодно большим при данном количестве частиц n_p , иначе возникают большие погрешности в используемом методе Монте-Карло численного моделирования (см. § 4). С другой стороны, t не может быть слишком маленьким, иначе погрешности η_t в соотношении (1) будут также предположительно значительными (здесь отметим, что авторы не знают аналитического результата об оценке скорости сходимости η_t к нулю).

Для того чтобы получить оценки для c и γ , мы переходим к модели линейной регрессии, для этого достаточно прологарифмировать левую и правую части приведенного выше равенства, в итоге мы получаем

$$-\ln p_t^* = -\ln c + \gamma \cdot \ln t + \varepsilon_t, \quad (2)$$

где $t = 20, 22, \dots, 300$ и ε_t – ошибка наблюдений. Далее методом наименьших квадратов из выражения (2) находим оценки для c и γ . Отметим, что нам хотелось бы получить оценку для γ , близкую к $k/2 = \ln 8 / \ln 9 \approx 0,946$ (см. § 1). В результате вычислений для модели симметричного блуждания мы получили оценку γ , равную 0,940, и оценку для c , равную 0,504 (рис. 4). Оценка параметра γ для модели блуждания с равномерным выбором направления движения равна 0,934, при этом оценка для c равна 0,503. Отметим, что оценки параметра γ для двух типов блужданий близки к предполагаемому значению $\ln 8 / \ln 9$.

Основным моментом численного моделирования построенных блужданий является ситуация, когда в некоторый момент времени точка попадает на сторону, но не на вершину вырезанного квадрата, в этом случае у точки возникают ровно два направления движения (вдоль стороны) для симметричного блуждания и ровно три – для блуждания с равномерным выбором направления движения. Итак, пусть $(0, 0)$, $(3^{k+1}, 0)$, $(3^{k+1}, 3^{k+1})$, $(0, 3^{k+1})$, $k \geq 1$ – координаты вершин квадрата K , из которого вырезается центральная часть. Соответственно, точки $(3^k, 3^k + l)$ и $(2 \cdot 3^k, 3^k + l)$, где $1 \leq l \leq 3^k - 1$, лежат на стороне, но не на вершине вырезанного квадрата (остальные два случая получаются просто перестановкой координат обозначенных двух случаев). Для

того чтобы блуждающая точка не попала внутрь вырезанного квадрата, следует получить необходимые и достаточные условия того, что точки $(3^k + 1, 3^k + 1)$ и $(2 \cdot 3^k - 1, 3^k + 1)$ уже лежат внутри вырезанного квадрата, и исключить из рассмотрения соответствующие направления перемещения. Такими *необходимыми и достаточными условиями* являются следующие:

1) существует один и тот же разряд в троичном представлении первой и второй координаты, на котором находится единица;

2) сумма цифр остальных (меньших) разрядов для каждой из координат больше либо равна единице.

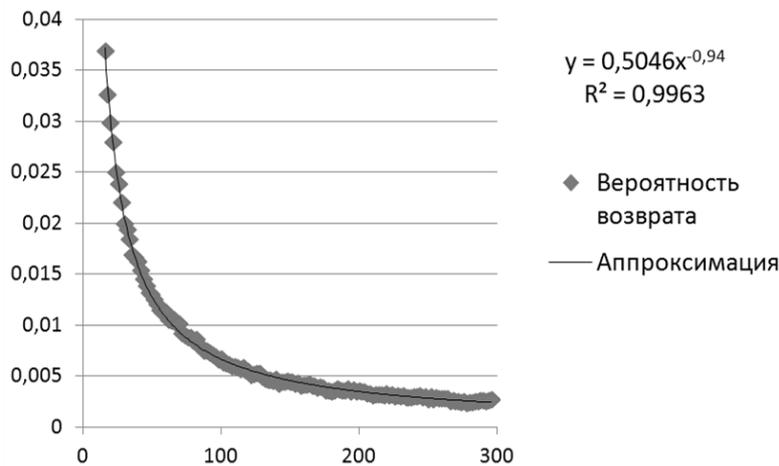


Рис. 4. Здесь показана вероятность возвращения для модели симметричного блуждания в зависимости от времени и ее аппроксимация по методу наименьших квадратов с коэффициентом детерминации (R^2)

Заметим, что в построенном нами бесконечном ковре Серпинского остальные квадраты со стороной 3^{k+1} , из которых также удаляется центральная часть, получаются из приведенного выше квадрата K с помощью параллельных переносов вдоль оси абсцисс или ординат, поэтому условия 1) и 2) сохраняются и для всех остальных случаев.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОГО КОЛИЧЕСТВА БЛУЖДАЮЩИХ ЧАСТИЦ

Мы рассматриваем n_p частиц, блуждающих независимо друг от друга. Обозначим через v_{n_p} число частиц, попавших в начало координат в момент времени t . Значение t мы будем брать последовательно от 20 до 300 с шагом 2. Для каждой представленной модели блуждания найдем значение n_p так, чтобы

$$P(|v_{n_p} / n_p - p_t| < 0,001) \geq 0,99,$$

где p_t – вероятность попадания в начало координат за t шагов. Неизвестные значения p_t в дальнейшем мы будем заменять их оценками p_t^* , полученными в результате численного моделирования. Из классической центральной предельной теоремы мы сразу же получаем, что $n_p \geq 2,57^2 p_t^* (1 - p_t^*) / 10^{-6}$, $t = 20 \dots 300$. Выражение $p_t^* (1 - p_t^*)$ достигает своего максимума при $t = 20$, стало быть, $n_p \geq 2,57^2 p_{20}^* (1 - p_{20}^*) / 10^{-6}$. Кроме того, необходимо учитывать погрешность при применении нормальной аппроксимации. Для этого будем использовать известную оценку Берри–Эссеена, в нашем случае эта оценка имеет вид: $1 / \sqrt{n_p p_t (1 - p_t)}$ (см., например, работы [14–15]). Выберем n_p так, чтобы $1 / \sqrt{n_p p_t^* (1 - p_t^*)} \leq 0,001$. Следовательно, величина n_p помимо полученного выше неравенства должна удовлетворять еще и следующему неравенству: $n_p \geq 10^6 / (p_{300}^* (1 - p_{300}^*))$. Мы взяли $t = 300$ в предыдущем неравенстве, поскольку при этом значении выражение $p_t^* (1 - p_t^*)$ достигает своего минимума.

Для модели симметричного блуждания мы получили: $p_{20}^* = 0,0299$ и $p_{300}^* = 0,0023$. Подставляя эти значения в приведенные выше неравенства, получаем, что $n_p \geq 4,33 \cdot 10^8$.

Для модели блуждания с равномерным выбором направления движения имеем $p_{20}^* = 0,0304$ и $p_{300}^* = 0,0025$ при этом $n_p \geq 3,89 \cdot 10^8$. Другие вычислительные погрешности связаны с применением псевдослучайных чисел (мы использовали среду программирования Turbo C++). Отметим еще раз, что мы для вычислений брали $n_p = 10^9$.

5. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Получены две модели случайного блуждания на развернутом на всю числовую плоскость \mathbb{R}^2 ковре Серпинского, удовлетворяющие естественным постулатам блуждания на самоподобном множестве. Для каждой модели средний квадрат расстояния от блуждающей точки до начала координат ведет себя линейно по времени, при этом для модели случайного блуждания с равномерным выбором направления движения этот факт проверен только численно. Линейность по времени соответствует единичной размерности геодезических ковра Серпинского. Вероятность возвращения в начало координат за t шагов, когда $t \rightarrow \infty$, ведет себя как c/t^γ , где значение γ для каждой модели блуждания, как показывает численное моделирование, близко к размерности Хаусдорфа ковра Серпинского.

6. ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Доказательство теоремы 1. Прежде всего отметим, что в силу построения последовательности $Z_t = (Z_{t,1}, Z_{t,2})$ ее первая координата $Z_{t,1}$ представляет собой сумму независимых радемахеровских случайных величин, поэтому очевидно, что $EZ_{t,1}^2 = t$ для всех t . Рассмотрим вторую координату $Z_{t,2}$. Опять же в силу построения Z_t выполняется равенство

$$Z_{t,2} = Z_{t-1,2} + \varepsilon_t \beta_t, \quad t \geq 1, \quad (3)$$

где β_t совпадает либо с η_t либо с ξ_t (в зависимости от положения предыдущей точки Z_{t-1}), а ε_t – случайная величина, принимающая значение 1 или -1 опять же в зависимости от положения точки Z_{t-1} (см. определение Z_t в § 2), т. е. ε_t – случайная величина, измеримая относительно σ -алгебры, порожденной случайной величиной Z_{t-1} , обозначим эту σ -алгебру через $\sigma(Z_{t-1})$. Рассмотрим условное математическое ожидание $E(Z_{t,2}^2 | \sigma(Z_{t-1}))$. Из выражения (3), а также из того, что ε_t измерима относительно $\sigma(Z_{t-1})$, следует равенство

$$E(Z_{t,2}^2 | \sigma(Z_{t-1})) = Z_{t-1,2}^2 + 1, \quad t \geq 1. \quad (4)$$

Применяя формулу полной вероятности к выражению (4) (см., например, [14–15]), получаем следующее рекурсивное соотношение:

$$EZ_{t,2}^2 = EZ_{t-1,2}^2 + 1, \quad t \geq 1. \quad (5)$$

Из равенства (5) следует $EZ_{t,2}^2 = t$, откуда получаем утверждение теоремы 1.

Теоретическое формирование результатов статьи принадлежит Н.С. Аркашову, программная реализация – Е.В. Лежневу.

Результаты работы обсуждались на семинарах кафедры высшей математики НГТУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеленый Л.М., Милованов А.В. Фрактальная топология и странная кинетика: от теории перколяции к проблемам космической электродинамики // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174, № 8. – С. 819–852.
2. Учайкин В.В. Автомодельная аномальная диффузия и устойчивые законы // Успехи физических наук. – 2003. – Т. 173, № 8. – С. 847–876.
3. Учайкин В.В. Субдиффузия и устойчивые законы // ЖЭТФ. – 1999. – Т. 115, № 6. – С. 2113–2132.
4. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 261 с.
5. Аркашов Н.С., Селезнев В.А. О модели случайного блуждания на множествах с самоподобной структурой // Сибирский математический журнал. – 2013. – Т. 54, № 6. – С. 1216–1236.

6. Селезнев В.А., Аркашов Н.С. Об условиях формирования процессов суб- и супердиффузии на самоподобных множествах // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – Т. 25, № 4. – С. 33–38.
7. Заславский Г.М. Гамильтонов хаос и фрактальная динамика. – Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2010. – 472 с.
8. Мосолов А.Б., Динариев О.Ю. Фракталы, скейлы и геометрия пористых материалов // ЖТФ. – 1988. – Т. 58, № 2. – С. 233–338.
9. Mandelbrot B. The fractal geometry of nature. – New York: Henry Holt and Company, 1983. – 468 p.
10. Фракталы и перколяция в пористой среде / Э. Гийон, К. Митеску, Ж.-П. Юлен, С. Ру // Успехи физических наук. – 1991. – Т. 161, № 10. – С. 121–128.
11. Edgar G. Measure, topology, and fractal geometry. – New York: Springer, 2008. – 268 p.
12. Falconer K. Fractal geometry mathematical foundations and applications. – London: Wiley, 2008. – 337 p.
13. Hutchinson J. Fractals and self similarity // Indiana University Mathematics Journal. – 1981. – Vol. 30, N 5. – P. 713–747. – doi: 10.1512/iumj.1981.30.30055.
14. Ширяев А.Н. Вероятность. – М.: Наука, 1980. – 581 с.
15. Боровков А.А. Теория вероятностей. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 470 с.

Аркашов Николай Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой высшей математики Новосибирского государственного технического университета. Основное научное направление исследований – случайные процессы. Имеет 13 публикаций. E-mail: nicky1978@mail.ru

Лежнев Евгений Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики Новосибирского государственного технического университета. Основное научное направление исследований – моделирование процессов переноса. Имеет 9 публикаций. E-mail: lionlev@yandex.ru

On a model of a random walk on the Sierpinski carpet *

N.S. ARKASHOV¹, E.V. LEZHNEV²

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Ph.D., head of Higher Mathematics Department. E-mail: nicky1978@mail.ru*

² *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: lionlev@mail.ru*

In this paper we describe the development and realization of two random walk models on a self-similar subset of the plane which can be regarded as the Sierpinski carpet expanded to the entire plane. This set will be called the Sierpinski carpet as a whole. The constructed models of a random walk allowed us to solve two problems, namely, to calculate mean squares of these random processes and to investigate the asymptotic behavior of the probability of returning to the starting point of the walk. The dimension of the geodesics of the Sierpinski carpet as a whole and the curves on which there is a random walk is equal to 1, whereas the dimension of the Sierpinski carpet has a fractional value. We followed the format of a random walk on the self-similar sets given in [1]. In this format, the mean square of a random walk depends on the Hausdorff dimension of the geodesic, and the probability of returning depends on the phase space dimension / the geodesic dimension ratio. We formulate our results for the Sierpinski carpet as a whole in a more precise way: the mean square of a walk is linear in time, the probability of returning to the origin after a specified number of steps is between the values of the classical probability of returning a symmetric random walk on a plane and on a straight line.

* Received 26 May 2015.

The work was supported by the RFBR (code 13-01-00661)

Once again, we note that the number of degrees of freedom defined as the phase space dimension / the geodesic dimension ratio has a fractional value for the Sierpinski carpet. The developed random walk model allows us to understand what causes the fractional nature of degrees of freedom. Indeed, due to the inhomogeneous structure of the Sierpinski carpet the number of possible directions of motion for a wandering point is not constant and it changes with time.

Keywords: transport processes, stochastic modeling, diffusion, Sierpinski carpet, random walk, Markov chain, self-similar sets, probability of return

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-83-93

REFERENCES

1. Zelenyi L.M., Milovanov A.V. Fraktal'naya topologiya i strannaya kinetika: ot teorii perkolyatsii k problemam kosmicheskoi elektrodinamiki [Fractal topology and strange kinetics: from percolation theory to problems in cosmic electrodynamics]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Physics-Uspekhi*, 2004, vol. 174, no. 8, pp. 819–852. (In Russian)
2. Uchaikin V.V. Avtomodel'naya anomal'naya diffuziya i ustoychivye zakony [Self-similar anomalous diffusion and Levy-stable laws]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Physics-Uspekhi*, 2003, vol. 173, no. 8, pp. 847–876. (In Russian)
3. Uchaikin V.V. Subdiffuziya i ustoychivye zakony [Subdiffusion and stable laws]. *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki – Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1999, vol. 115, no. 6, pp. 2113–2132. (In Russian)
4. Feder E. *Fraktaly* [Fractals]. Moscow, Mir Publ., 1991. 261 p.
5. Arkashov N.S., Seleznev V.A. O modeli sluchainogo bluzhdaniya na mnozhestvakh s samopodobnoi strukturoi [On a random walk model on sets with self-similar structure]. *Sibirskii Matematicheskii Zhurnal – Siberian Mathematical Journal*, 2013, vol. 54, no. 6, pp. 1216–1236. (In Russian)
6. Seleznev V.A., Arkashov N.S. Ob usloviyakh formirovaniya protsessov sub- i superdiffuzii na samopodobnykh mnozhestvakh [On conditions of forming processes of sub- and superdiffusion on sets with self-similar structures]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, vol. 25, no. 4, pp. 32–33.
7. Zaslavskii G.M. *Gamil'tonov khaos i fraktal'naya dinamika* [Hamiltonian chaos and fractal dynamics]. Izhevsk, Regularnaya i khaoticheskaya dinamika Publ., 2010. 472 p.
8. Mosolov A.B., Dinariev O.Yu. Fraktaly, skeily i geometriya poristykh materialov [Fractals, skills and geometry of porous materials]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Soviet Physics: Technical Physics*, 1988, vol. 58, no. 2, pp. 233–338. (In Russian)
9. Mandelbrot B. *The fractal geometry of nature*. New York, Henry Holt and Company, 1983. 468 p.
10. Giion E., Mitesku K., Yulen Zh.-P., Ru S. Fraktaly i perkolyatsiya v poristoi srede [Fractals and percolation in porous media]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Soviet Physics Uspekhi*, 1991, vol. 161, no. 10, pp. 121–128. (In Russian)
11. Edgar G. *Measure, topology, and fractal geometry*. New York, Springer, 2008. 268 p.
12. Falconer K. *Fractal geometry mathematical foundations and applications*. London, Wiley, 2008. 337 p.
13. Hutchinson J. Fractals and self similarity. *Indiana University Mathematics Journal*, 1981, vol. 30, no. 5, pp. 713–747. doi: 10.1512/iumj.1981.30.30055
14. Shiryaev A.N. *Veroyatnost'* [Probability]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 581 p.
15. Borovkov A.A. *Teoriya veroyatnostei* [Probability]. Moscow, Editorial URSS Publ., 1999. 470 p.

УДК 621.314.04

Методика расчета входного фильтра импульсного преобразователя переменного напряжения*

Р.Л. ГОРБУНОВ¹, Д.В. МАКАРОВ²

¹ 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, аспирант. E-mail: romangorbunov91@gmail.com

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: artam-ture.current@gmail.com

В статье предлагается методика расчета параметров входного однозвенного фильтра нижних частот. Методика предназначена для импульсных (вентильных) преобразователей переменного напряжения с высокочастотным широтно-импульсным регулированием. Расчет осуществляется по стандартным показателям несинусоидальных искажений токов и напряжений, а именно по суммарному коэффициенту гармонических составляющих (коэффициенту гармоник) и по коэффициенту n -й гармонической составляющей. В основу синтеза методики положено представление преобразователя в виде эквивалентного управляемого источника тока или напряжения с несинусоидальной формой, благодаря чему методика применима к широкому классу преобразователей с различным законом управления, а также к преобразователям, реализуемым по модульному принципу построения. Степень искажения токов и напряжений представлена в виде упрощенных интегральных коэффициентов тока и напряжения преобразователя. Полученные зависимости основываются на прямых методах расчета энергетических показателей в вентильных преобразователях. Рассмотрено пассивное демпфирование фильтра с помощью последовательной активно-индуктивной демпфирующей цепи. Установлено, что при оптимальных параметрах демпфирующей цепи эффективность фильтрации входного тока преимущественно определяется параметрами самой цепи. Расчет элементов демпфирующей цепи включен в методику. Методика представлена в удобном для алгоритмизации виде, но не является итерационной. Приведен пример расчета номиналов элементов входного фильтра трехфазного трехмодульного активного выпрямителя напряжения с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией и симметричным фазовым сдвигом опорных напряжений модуляторов. Результаты расчета проверены имитационным моделированием преобразователя с фильтром, рассчитанным по предложенной методике, в программе Matlab Simulink.

Ключевые слова: входной фильтр, преобразователь переменного напряжения, широтно-импульсное регулирование, методика, коэффициент гармоник, коэффициент n -й гармонической составляющей, модульный принцип построения преобразователей, пассивное демпфирование

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-94-112

* Статья получена 18 мая 2015 г.

ВВЕДЕНИЕ

Импульсный преобразователь переменного напряжения является потребителем несинусоидального тока. С целью повышения качества потребляемого тока на входе преобразователя устанавливается фильтр нижних частот. В преобразователях с высокочастотным широтно-импульсным регулированием основная функция фильтра состоит в подавлении высокочастотных гармоник тока. В основу фильтра обычно закладывается однозвенный LC-фильтр, что обусловлено простотой конструкции при достаточной для преобразователей этого класса эффективности фильтрации.

Стандартными показателями несинусоидальных искажений токов и напряжений являются суммарный коэффициент гармонических составляющих (коэффициент гармоник) и коэффициент n -й гармонической составляющей [1]. Предложенные на сегодня методики расчета номиналов элементов фильтра отмеченными показателями либо не учитываются вовсе [2–6], либо только косвенно отражают коэффициент n -й гармонической составляющей входного тока [7–11].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является создание методики расчета параметров входного однозвенного фильтра преобразователя переменного напряжения по заданному коэффициенту гармоник или коэффициенту n -й гармонической составляющей токов и напряжений. Методика должна быть применимой к широкому классу преобразователей с различным законом управления, а также к случаю модульного способа построения преобразователей.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

- описание зависимости показателей несинусоидальных искажений токов и напряжений фильтра от параметров фильтра и преобразователя;
- распространение полученных результатов на преобразователи, реализуемые по модульному принципу построения;
- определение влияния пассивного демпфирования фильтра на показатели несинусоидальных искажений;
- построение методики расчета параметров фильтра.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Рассмотрим многофазный вентильный преобразователь, подключенный к источнику напряжений через фильтр нижних частот. По отношению к фильтру вентильный преобразователь можно представить эквивалентным управляемым источником несинусоидального тока или напряжения (рис. 1). Замена эквивалентным источником тока осуществляется для преобразователей типа источника напряжения (ИН), а замена эквивалентным источником напряжения – для преобразователей типа источника тока (ИТ) [12]. Между преобразователем типа ИТ и фильтром устанавливаются разделительные реакторы, которые далее будем считать элементами фильтра.

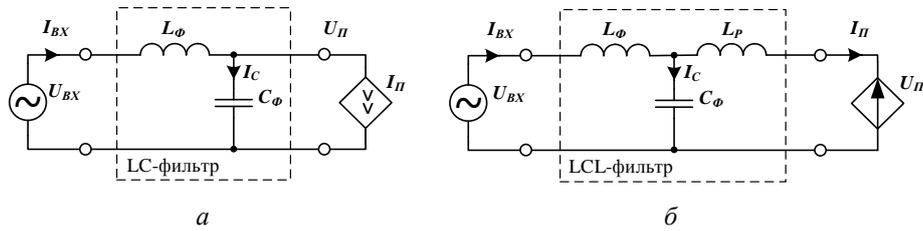


Рис. 1. Эквивалентные схемы замещения анализируемой системы с преобразователем типа ИН (а) и ИТ (б)

Примерами преобразователей типа ИН являются матричный преобразователь и непосредственные регуляторы переменного напряжения, типа ИТ – активный выпрямитель напряжения.

Примем следующие допущения:

- система питающих напряжений, преобразователь и фильтр симметричные;
- питающие напряжения имеют синусоидальную форму;
- индуктивность питающей сети много меньше индуктивности реакторов фильтра;
- основные характеристики элементов фильтра линейные;
- силовые ключи идеальные, межкоммутационная пауза отсутствует;
- отношение частоты коммутации к частоте основной гармоники питающего напряжения удовлетворяет соотношению $N_S = f_S / f_{(1)} \gg 10$;
- преобразователь вносит только высокочастотные искажения, т. е. гармоники с частотами, значительно превышающими частоту первой гармоники.

В рассматриваемой системе эффективность фильтрации преимущественно определяется параметрами фильтра, частоты генерируемых гармоник – частотой коммутации, а амплитуды генерируемых гармоник – характеристиками преобразователя и законом управления. Следовательно, для создания общей методики расчета номиналов элементов фильтра необходимо описать зависимость показателей качества токов и напряжений от параметров фильтра, частоты коммутации и некоторых обобщенных параметров преобразователя. В качестве последних удобно использовать приведенные интегральные показатели несинусоидальных искажений, а именно приведенный интегральный коэффициент гармоник и приведенный интегральный коэффициент n -й гармонической составляющей. Эти коэффициенты отражают степень вносимых несинусоидальных искажений и могут быть определены известными способами [12, 13].

В соответствии с определением интегральный коэффициент гармоник и интегральный коэффициент n -й гармонической составляющей обобщенной переменной $V(t)$ рассчитываются по следующим выражениям [12]:

$$\overline{K}_{\Gamma V}^{(q)} = \frac{1}{V_{(1)}} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_{(n)}}{n^q} \right)^2}, \quad (1)$$

$$\overline{K}_{V(n)}^{(q)} = \frac{1}{n^q} \frac{V_{(n)}}{V_{(1)}}, \quad (2)$$

где n – порядковый номер гармоники при разложении переменной V в ряд Фурье;

$V_{(n)}$ – амплитуда n -й гармоники переменной V ;

q – порядок интегрального коэффициента гармоник.

В преобразователях с высокочастотным широтно-импульсным регулированием основная доля высших гармоник представлена в спектре группами. Каждая группа гармоник сосредоточена на частотах, кратных частоте коммутации f_S (рис. 2). При кратности частоты коммутации $N_S \gg 10$ можно считать, что в пределах группы частоты гармоник практически одинаковы и соответствуют номеру группы, т. е.

$$f_j = j \cdot f_S, \quad (3)$$

где f_j – частота высших гармоник группы j , $j = 1, 2, \dots$

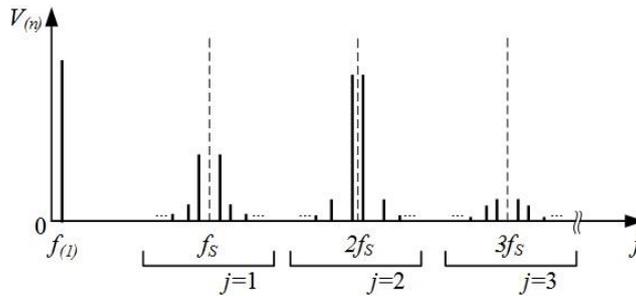


Рис. 2. Пример спектрального состава токов и напряжений преобразователя

С учетом равенства (3) выражения (1) и (2) принимают вид

$$\overline{K}_{\Gamma V}^{(q)} \approx \frac{1}{N_S^q} \frac{1}{V_{(1)}} \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} \frac{V_j^{\Sigma}}{j^{2q}}} = \frac{1}{N_S^q} \overline{K}_{\Gamma V_{пр}}^{(q)}, \quad (4)$$

$$\overline{K}_{V(n)}^{(q)} \approx \frac{1}{N_S^q} \frac{1}{j^q} \frac{V_{(n)}}{V_{(1)}} = \frac{1}{N_S^q} \overline{K}_{V(n)_{пр}}^{(q)}, \quad (5)$$

где V_j^{Σ} – сумма квадратов амплитуд гармоник j -й группы переменной V ;

$\overline{K}_{\Gamma V_{пр}}^{(q)}$ – приведенный интегральный коэффициент гармоник q -го порядка переменной V ;

$\overline{K}_{V(n)_{пр}}^{(q)}$ – приведенный интегральный коэффициент n -й гармонической составляющей q -го порядка переменной V .

В выражениях (4) и (5) влияние частоты коммутации на величину интегральных коэффициентов гармоник учитывается коэффициентом N_s . При этом можно считать, что приведенные интегральные коэффициенты гармоник практически не зависят от частоты коммутации.

Выполним анализ системы на примере преобразователя типа ИН. Векторная модель системы с учетом принятых допущений в общем случае описывается следующими уравнениями:

$$\begin{cases} L_{\Phi} \frac{dI_{\text{ВХ}}(t)}{dt} = -R_{\Phi} I_{\text{ВХ}}(t) - \omega_K G \cdot L_{\Phi} I_{\text{ВХ}}(t) - U_C(t) + U_{\text{ВХ}}(t), \\ C_{\Phi} \frac{dU_C(t)}{dt} = I_{\text{ВХ}}(t) - I_{\text{П}}(t) - \omega_K G \cdot C_{\Phi} U_C(t), \end{cases} \quad (6)$$

$$R_{\Phi} = r_{\Phi} \cdot E; \quad L_{\Phi} = l_{\Phi} \cdot E; \quad C_{\Phi} = c_{\Phi} \cdot E,$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $I_{\text{ВХ}}$ – вектор-столбец входного тока;

U_C – вектор-столбец напряжения на конденсаторе фильтра;

$I_{\text{П}}$ – вектор-столбец тока преобразователя;

$U_{\text{ВХ}}$ – вектор-столбец входного напряжения (напряжения источника питания);

R_{Φ} – матрица суммарных активных сопротивлений источника питания и реакторов фильтра;

L_{Φ} – матрица индуктивностей реакторов фильтра;

C_{Φ} – матрица емкостей конденсаторов фильтра;

ω_K – угловая частота вращения системы координат.

Система уравнений (6) при постоянной частоте ω_K является линейной. Токи и напряжения можно представить в виде суммы двух составляющих

$$v(t) = v_{(1)}(t) + v_{\text{в.г}}(t),$$

где $v_{(1)}$ – первая гармоника обобщенной переменной v ;

$v_{\text{в.г}}$ – сумма высших гармоник обобщенной переменной v .

Уравнения по высшим гармоникам в стационарной системе координат ($\omega_K = 0$) принимают вид:

$$\begin{cases} l_{\Phi} \frac{di_{\text{ВХ в.г}}(t)}{dt} = -r_{\Phi} i_{\text{ВХ в.г}}(t) - u_{C \text{ в.г}}(t), \\ c_{\Phi} \frac{du_{C \text{ в.г}}(t)}{dt} = i_{\text{ВХ в.г}}(t) - i_{\text{П в.г}}(t). \end{cases} \quad (7)$$

Выражение для расчета действующего значения суммы высших гармоник тока I_{BX} , полученное в результате алгебраизации уравнений (7) методом АДУ2 [12, 13], имеет следующий вид:

$$I_{BX_{д.в.г}} = N_{\Phi}^2 \cdot I_{Пд(1)} \sqrt{\left(\overline{K}_{\Gamma I_{\Pi}}^{(2)}\right)^2 + \left(N_L \cdot \overline{K}_{\Gamma I_{\Pi}}^{(3)}\right)^2}, \quad (8)$$

где N_{Φ} – коэффициент отношения резонансной частоты фильтра к частоте первой гармоники;

N_L – коэффициент отношения эквивалентной частоты реактора фильтра к частоте первой гармоники;

$\overline{K}_{\Gamma I_{\Pi}}^{(q)}$ – интегральный коэффициент гармоник q -го порядка тока I_{Π} ;

$$N_{\Phi} = \frac{\omega_{\Phi}}{\omega_{(1)}} = \frac{1}{\omega_{(1)} \sqrt{l_{\Phi} \cdot c_{\Phi}}}; \quad N_L = \frac{\omega_L}{\omega_{(1)}} = \frac{1}{\omega_{(1)}} \frac{r_{\Phi}}{l_{\Phi}}.$$

Подставив выражение (4) в (8), несложно показать, что при условии

$$f_L \ll f_S,$$

где

$$f_L = \omega_L / (2\pi),$$

вторым слагаемым подкоренной суммы можно пренебречь. Полагая, что величина первой гармоники тока конденсатора фильтра значительно меньше величины первой гармоники тока I_{BX} , искомое выражение для коэффициента гармоник тока I_{BX} имеет вид

$$K_{\Gamma I_{BX}} = \frac{I_{BX_{д.в.г}}}{I_{BX_{д(1)}}} \approx N_{\Phi S}^2 \cdot \overline{K}_{\Gamma I_{\Pi}}^{(2)}, \quad (9)$$

где $I_{BX_{д(1)}}$ – действующее значение первой гармоники тока I_{BX} ;

$N_{\Phi S}$ – коэффициент отношения резонансной частоты фильтра к частоте коммутации, $N_{\Phi S} = \omega_{\Phi} / \omega_S$.

По аналогии получено выражение для расчета коэффициента гармоник напряжения на конденсаторе фильтра U_C . При условии, что падение напряжения первой гармоники на реакторе фильтра значительно меньше амплитуды входного напряжения, это выражение имеет следующий вид:

$$K_{\Gamma U_C} = \frac{U_{C_{д.в.г}}}{U_{C_{д(1)}}} \approx \frac{x_{CS}}{z_{П(1)}} \overline{K}_{\Gamma I_{\Pi}}^{(1)}, \quad (10)$$

где x_{CS} – реактивное сопротивление конденсатора на частоте коммутации ω_S ;

$z_{П(1)}$ – модуль входного импеданса преобразователя по первой гармонике;

$$x_{CS} = 1 / (\omega_S \cdot c_{\Phi}); \quad z_{П(1)} = U_{Пд(1)} / I_{Пд(1)}.$$

При замене в выражениях (9) и (10) интегрального коэффициента гармоник на интегральный коэффициент n -й гармонической составляющей резуль-

татом будет действующее значение n -й гармоники. В связи с этим все последующие выражения приведены только для коэффициента гармоник.

Модуль входного импеданса преобразователя по первой гармонике можно определить из закона баланса мощностей:

$$z_{\Pi(1)} \approx m_f \cdot k_{c(1)} \frac{U_{\text{ВХд}(1)}^2}{P_H},$$

где m_f – количество фаз преобразователя;

$k_{c(1)}$ – коэффициент сдвига первой гармоники тока I_{Π} ;

P_H – активная мощность нагрузки.

Рассмотрим систему с преобразователем типа ИТ. При условиях

$$f_L \ll f_s,$$

$$f_P \ll f_s,$$

где

$$f_P = \frac{1}{2\pi\sqrt{l_P \cdot c_{\Phi}}},$$

выражения для коэффициента гармоник тока $I_{\text{ВХ}}$, напряжения U_C и тока I_{Π} имеют следующий вид:

$$K_{\Gamma I_{\text{ВХ}}} \approx N_{\Phi S}^2 \cdot \overline{K}_{\Gamma I_{\Pi\text{ПР}}}^{(2)}, \quad (11)$$

$$K_{\Gamma U_C} \approx \frac{x_{CS}}{z_{\Pi(1)}} \overline{K}_{\Gamma I_{\Pi\text{ПР}}}^{(1)}, \quad (12)$$

$$K_{\Gamma I_{\Pi}} \approx \frac{z_{\Pi(1)}}{x_{P,S}} \overline{K}_{\Gamma U_{\Pi\text{ПР}}}^{(1)}, \quad (13)$$

где $x_{P,S}$ – реактивное сопротивление разделительного реактора на частоте коммутации ω_S ;

$$x_{P,S} = \omega_S \cdot l_P.$$

Выражения (9), (10) и (11), (12) показывают, что степень искажения тока $I_{\text{ВХ}}$ и напряжения U_C в обоих случаях пропорциональна приведенному коэффициенту гармоник тока преобразователя I_{Π} . Этот факт важно учитывать для преобразователя типа ИТ, так как в этом случае приведенный интегральный коэффициент гармоник тока I_{Π} зависит от величины индуктивности разделительного реактора:

$$\overline{K}_{\Gamma I_{\Pi\text{ПР}}}^{(q)} \approx \frac{z_{\Pi(1)}}{x_{P,S}} \overline{K}_{\Gamma U_{\Pi\text{ПР}}}^{(q+1)}.$$

Необходимо отметить, что коэффициент гармоник тока I_{Π} определяется интегральным коэффициентом гармоник напряжения U_{Π} 1-го порядка, а тока $I_{ВХ}$ – 3-го порядка, которые в соответствии с выражением (4) отличаются более чем в квадрат кратности частоты коммутации N_s . В связи с этим в большинстве случаев для обеспечения необходимых показателей несинусоидальных искажений токов I_{Π} и $I_{ВХ}$ величина индуктивности разделительного реактора l_p требуется значительно большей, чем реактора l_{Φ} .

Исходя из ограничений на установленную мощность конденсаторов фильтра по первой гармонике можно определить максимальную величину емкости конденсатора фильтра:

$$c_{\Phi \max} = \frac{k_{Q.C} \cdot P_H}{m_f \cdot \omega_{(1)} \cdot U_{ВХд(1)}^2},$$

где $k_{Q.C}$ – коэффициент установленной мощности конденсаторов фильтра по отношению к активной мощности нагрузки;

$\omega_{(1)}$ – угловая частота первой гармоники.

При коэффициенте установленной мощности, равном $k_{Q.C} = 0,05 \dots 0,1$, влияние фильтра на амплитуду первой гармоники входного тока $I_{ВХ}$ можно считать незначительным [6–8].

3. МОДУЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Одним из наиболее часто применяемых способов наращивания мощности преобразовательной установки является параллельное подключение нескольких одинаковых преобразователей (модулей) [14–17]. Вносимые группой преобразователей несинусоидальные искажения зависят от типа согласования модулей и величины фазового сдвига опорных напряжений модуляторов. Покажем, что приведенные выше выражения для определения коэффициентов искажения токов и напряжений фильтра применимы и к преобразователям с модульным принципом построения независимо от способа согласования модулей.

Пусть к фильтру подключена группа из M одинаковых модулей (рис. 3). Каждый модуль можно представить в виде эквивалентного источника тока или напряжения. В соответствии с методами эквивалентного преобразования источников представим параллельно включенные источники тока в виде эквивалентного суммарного источника

$$I_{\Pi \Sigma}(t) = \sum_{m=1}^M I_{\Pi m}(t),$$

а источники напряжения с последовательным сопротивлением $Z_{ВН}$ – в виде суммарного источника напряжения

$$U_{\Pi \Sigma}(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M U_{\Pi m}(t),$$

с сопротивлением

$$Z_{BH \text{ экв}} = Z_{BH} / M .$$

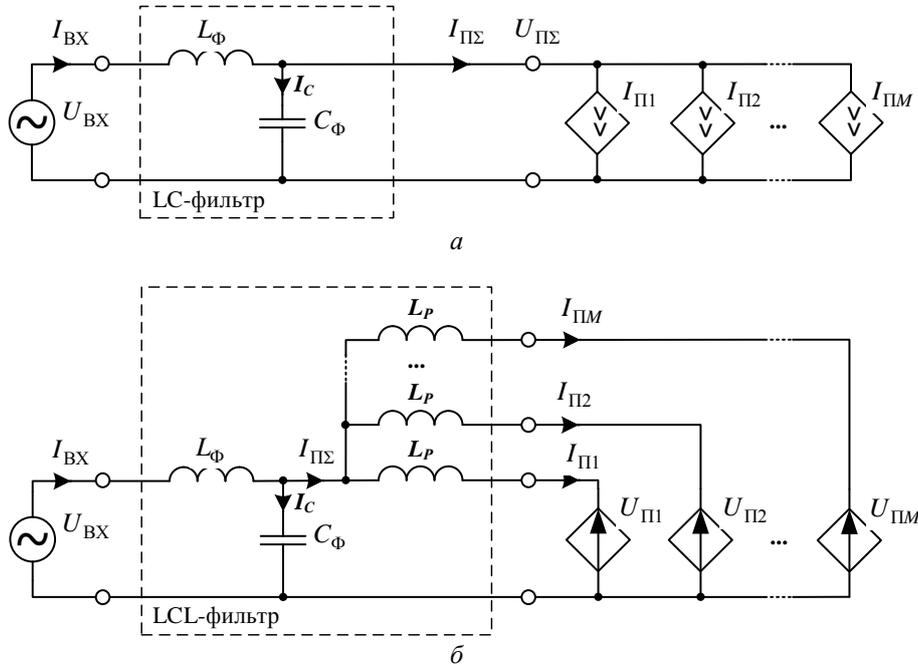


Рис. 2. Эквивалентные схемы замещения системы с параллельным соединением преобразователей типа ИН (а), ИТ (б)

Таким образом, модели систем с модульным построением преобразователей аналогичны случаю одного преобразователя. Отличием является замена в уравнениях системы тока I_{Π} и напряжения U_{Π} на суммарные $I_{\Pi\Sigma}$, $U_{\Pi\Sigma}$. Следовательно, в выражениях (9)–(12) изменяются только интегральные коэффициенты:

$$K_{\Gamma I_{\text{ВХ}}} \approx N_{\Phi S}^2 \cdot \overline{K}_{\Gamma I_{\Pi\Sigma \text{ пр}}}^{(2)},$$

$$K_{\Gamma U_C} \approx \frac{x_{C.S}}{z_{\Pi(1)}} \overline{K}_{\Gamma U_{\Pi\Sigma \text{ пр}}}^{(1)}.$$

Для преобразователя типа ИТ приведенные интегральные коэффициенты тока преобразователя $I_{\Pi\Sigma}$ выражаются через приведенные интегральные коэффициенты суммарного напряжения преобразователя $U_{\Pi\Sigma}$:

$$\overline{K}_{\Gamma I_{\Pi\Sigma \text{ пр}}}^{(q)} = \frac{z_{\Pi(1)}}{x_{PS}} \overline{K}_{\Gamma U_{\Pi\Sigma \text{ пр}}}^{(q+1)}.$$

Коэффициент гармоник тока I_{Π} одного модуля пропорционален приведенному интегральному коэффициенту гармоник напряжения модуля:

$$K_{GI_{\Pi}} \approx \frac{z_{\Pi(1)}}{x_{PS}} \overline{K}_{GU_{\Pi\Pi P}}^{(1)}. \quad (14)$$

Параметры $z_{\Pi(1)}$, x_{PS} в описанных выражениях являются параметрами одного преобразователя из группы, т. е.

$$z_{\Pi(1)} \approx M \cdot m_f \cdot k_{c(1)} \frac{U_{BX(1)}^2}{P_H},$$

$$x_{PS} = \omega_S \cdot l_P.$$

Выражение (14) абсолютно совпадает с выражением для случая одного преобразователя (13). Однако необходимо отметить, что при одинаковых суммарных мощностях преобразовательной установки и индуктивностях разделительного реактора l_P степень искажения тока одного преобразователя I_{Π} при модульном построении будет в M раз большей. Это связано с тем, что в M раз увеличивается модуль входного импеданса $z_{\Pi(1)}$, т. е. уменьшается амплитуда первой гармоники. Следовательно, для обеспечения того же уровня несинусоидальных искажений токов I_{Π} при модульном построении требуется в M раз большая величина индуктивности разделительных реакторов, чем при единичном построении.

Полученные выражения являются общими и применимы к преобразователям с симметричным и несимметричным фазовым сдвигом опорных напряжений модуляторов. Тип согласования модулей и величина фазового сдвига влияют на величину приведенного интегрального коэффициента гармоник суммарного тока и напряжения.

4. ДЕМПФИРОВАНИЕ ФИЛЬТРА

Силовой LC-фильтр представляет собой колебательное низкодемпфированное звено. Одним из наиболее эффективных способов пассивного демпфирования фильтра является включение активно-индуктивной демпфирующей цепи параллельно реактору фильтра (рис. 4).

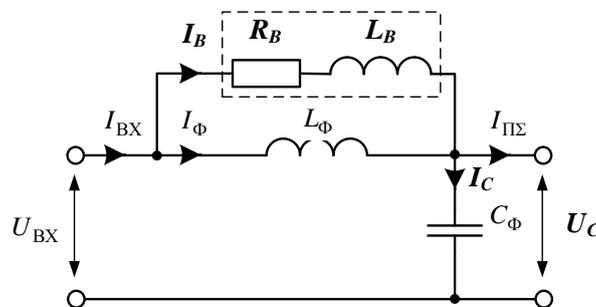


Рис. 4. Фильтр с активно-индуктивным демпфером

Известно, что оптимальными параметрами цепи являются следующие [4–6, 9]:

$$l_B = 2/15l_\Phi,$$

$$r_B = \sqrt{l_\Phi/c_\Phi}.$$

При условии

$$f_B \ll f_S,$$

где

$$f_B = \frac{1}{2\pi} \frac{r_B}{l_B},$$

и с учетом, что $l_B \ll l_\Phi$, упрощенное выражение для расчета коэффициента гармоник тока I_{BX} имеет следующий вид:

$$K_{GI_{BX}} \approx N_{\Phi S}^2 \cdot \overline{K}_{GI_{\Sigma}^{(2)pr}}, \quad (15)$$

где

$$N_{\Phi S} = \frac{\omega_\Phi}{\omega_S} \approx \frac{1}{\omega_S \sqrt{l_B \cdot c_\Phi}}.$$

Из выражения (15) следует, что при оптимальных параметрах демпфирующей цепи эффективность фильтрации преимущественно определяется индуктивностью этой цепи l_B .

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные математические формулы для расчета коэффициента гармоник входного тока I_{BX} и напряжения конденсатора фильтра U_C для всех рассмотренных случаев аналогичны и в явном виде содержат три группы параметров: параметры первой группы определяются номиналами элементов фильтра, второй – частотой коммутации, третьей – свойствами преобразователя. Именно такая форма закладывалась на начальном этапе при выборе показателей и методов анализа. Формулы записаны для коэффициентов гармоник, но при замене приведенных интегральных коэффициентов гармоник на приведенные интегральные коэффициенты n -й гармонической составляющей позволяют рассчитать коэффициент n -й гармонической составляющей соответствующей переменной.

Важно отметить, что полученные формулы являются приближенными, и можно выделить три основных источника погрешности. Первым источником погрешности являются принятые на начальном этапе анализа допущения. Наиболее значимую ошибку вносит допущение о синусоидальности питающих напряжений, так как в подавляющем большинстве случаев напряжения являются искаженными и содержат гармоники низких порядков (5-я, 7-я и другие). Ввиду того, что фильтр является высокочастотным, влияние фильтра

на эти гармоники практически отсутствует. Более того, при несинусоидальном входном напряжении конденсатор фильтра является усилителем искажений входного тока, и для минимизации этого эффекта величина емкости конденсатора должна быть как можно меньшей.

Вторым источником погрешности является ограниченная точность приведенных интегральных коэффициентов тока и напряжения преобразователя. Эти коэффициенты, как правило, определяются для преобразователя, функционирующего в статическом режиме. В случае, когда контур управления замкнут по какой-либо переменной, модулирующий сигнал имеет динамическую составляющую, которая безусловно оказывает влияние на спектральный состав токов и напряжений. Более того, при модульном построении преобразователей рассогласования в управлении модулями асимметрия элементов приводит к появлению уравнивающих токов, которые вносят заметные низкочастотные искажения. Высокочастотный фильтр не в состоянии подавить эти искажения в достаточной степени и, если в системе управления не предусмотрена компенсация уравнивающих токов, влияние дополнительных гармоник на качество входного тока будет существенным [16, 17].

Третьим источником погрешности являются выполненные в ходе анализа упрощения формул. Тем не менее все упрощения являются вполне обоснованными, и вносимая ими погрешность на фоне других источников является незначительной.

С учетом указанных особенностей можно сказать, что выражения для расчета коэффициента гармоник K_G являются оценочными и результат представляет собой коэффициент только высокочастотных гармоник. Выражения для расчета коэффициента n -й гармонической составляющей $K_{(n)}$ являются более точными, так как рассчитываются по конкретной гармонике.

6. МЕТОДИКА РАСЧЕТА НОМИНАЛОВ ЭЛЕМЕНТОВ ФИЛЬТРА

Ниже приведена методика расчета номиналов элементов фильтра с демпфированием для случая модульного построения преобразователей типа ИТ. При исключении определенных шагов эта методика применима ко всем рассмотренным выше случаям. Методика описана для расчета номиналов элементов по коэффициентам гармоник, при этом замена коэффициентов гармоник на коэффициенты n -й гармонической составляющей позволяет рассчитывать номиналы исходя из этих показателей.

Исходные данные:

- количество модулей, M ;
- количество фаз, m_f ;
- циклическая частота первой гармоники, $f_{(1)}$;
- циклическая частота коммутации, f_s ;
- действующее значение первой гармоники входного напряжения,

$U_{ВХд(1)}$;

- коэффициент сдвига первой гармоники тока преобразователя, $k_{c(1)}$;
- активная мощность нагрузки, P_H ;
- приведенные интегральные коэффициенты гармоник напряжения преобразователя порядка $q = 1 \dots 3$.

Максимально-допустимые показатели:

- коэффициенты гармоник переменных $I_{ВХ}$, $I_{П}$, U_C ;
- коэффициент установленной мощности конденсаторов фильтра, $k_{Q.C}$.

Последовательность расчета:

1. Рассчитывается модуль входного импеданса:

$$z_{П(1)} = M \cdot m_f \cdot k_{c(1)} \frac{U_{ВХд(1)}^2}{P_H}.$$

2. Рассчитывается минимальная требуемая величина индуктивности разделительного реактора:

$$l_P = \frac{z_{П(1)} \overline{K}_{ГУ_{П\pi\pi}}^{(1)}}{2\pi \cdot f_S \cdot K_{Г\Gamma_{П}}}$$

3. Рассчитываются приведенные интегральные коэффициенты гармоник тока преобразователя порядка $q = 1, 2$:

$$\overline{K}_{Г\Gamma_{П\Sigma\pi\pi}}^{(q)} = \frac{z_{П(1)} \overline{K}_{ГУ_{П\pi\pi}}^{(q+1)}}{2\pi \cdot f_S \cdot l_P}.$$

4. Рассчитывается максимально-допустимая величина емкости конденсатора фильтра:

$$c_{\Phi\max} = \frac{k_{Q.C} \cdot P_H}{m_f \cdot 2\pi \cdot f_{(1)} \cdot U_{ВХд(1)}^2}.$$

5. Рассчитывается минимальная требуемая величина емкости конденсатора фильтра:

$$c_{\Phi} = \frac{1}{2\pi \cdot f_S \cdot z_{П(1)}} \frac{\overline{K}_{Г\Gamma_{П\Sigma\pi\pi}}^{(1)}}{K_{Г\Gamma_{UC}}}$$

6. Если минимальная требуемая величина емкости c_{Φ} превышает максимально допустимую $c_{\Phi\max}$, то следует принять $c_{\Phi} = c_{\Phi\max}$ и уменьшить пульсации тока преобразователя за счет увеличения величины индуктивности разделительного реактора:

$$\overline{K}_{Г\Gamma_{П\Sigma\pi\pi}}^{(1)} = 2\pi \cdot f_S \cdot c_{\Phi} \cdot z_{П(1)} \cdot K_{Г\Gamma_{UC}},$$

$$l_P = \frac{z_{П(1)} \overline{K}_{ГУ_{П\pi\pi}}^{(2)}}{2\pi \cdot f_S \cdot \overline{K}_{Г\Gamma_{П\Sigma\pi\pi}}^{(1)}},$$

$$\overline{K}_{\Gamma I \Sigma \text{пр}}^{(2)} = \frac{z_{\Pi(1)}}{2\pi \cdot f_S \cdot l_P} \overline{K}_{\Gamma U \Pi \Sigma \text{пр}}^{(3)}.$$

7. Рассчитывается требуемый максимальный коэффициент отношения резонансной частоты фильтра к частоте коммутации:

$$N_{\Phi S} = \sqrt{\frac{K_{\Gamma I \text{ВХ}}}{\overline{K}_{\Gamma I \Sigma \text{пр}}^{(2)}}}.$$

8. Рассчитывается минимальная требуемая величина индуктивности реактора демпфирующей цепи:

$$l_B = \frac{1}{(N_{\Phi S} \cdot 2\pi \cdot f_S)^2 c_{\Phi}}.$$

9. Рассчитывается оптимальная величина индуктивности реактора фильтра:

$$l_{\Phi} = 15/2 l_B.$$

10. Рассчитывается оптимальная величина сопротивления демпфирующего резистора:

$$r_B = \sqrt{l_{\Phi} / c_{\Phi}}.$$

Результатом расчета являются номиналы l_{Φ} , c_{Φ} , l_P , l_B , r_B .

Как правило, расчет номиналов элементов выполняется для номинальной нагрузки преобразователя. Если необходимо обеспечивать требования по коэффициенту гармоник в заданном диапазоне изменения нагрузки, то на первом шаге выполняется расчет максимальной и минимальной величины входного импеданса преобразователя. Минимальное значение следует использовать при расчете на пятом шаге.

После расчета величины емкости конденсатора фильтра и индуктивности реактора демпфирующей цепи важно убедиться в том, что частота резонанса фильтра достаточно удалена от частот, кратных частоте коммутации. При необходимости уменьшения коэффициента отношения резонансной частоты $N_{\Phi S}$ следует увеличить номиналы этих элементов.

В случае определения номиналов элемента фильтра преобразователя типа ИН расчет величины индуктивности разделительного реактора и приведенных интегральных коэффициентов гармоник тока преобразователя не требуется. При расчете недемпфированного фильтра на восьмом шаге сразу рассчитывается величина индуктивности реактора фильтра l_{Φ} и последующие шаги пропускаются.

7. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Рассмотрим расчет входного фильтра трехфазного трехмодульного активного выпрямителя напряжения с синусоидальной ШИМ и симметричным сдвигом опорных напряжений модуляторов. Параметры преобразователя и максимально допустимые показатели приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Параметры преобразователя

Количество фаз (m_f)	3
Количество модулей (M)	3
Угол сдвига опорных напряжений модуляторов (γ), эл. град	120
Частота первой гармоники ($f_{(1)}$), Гц	50
Частота коммутации (f_s), кГц	75
Действующее значение входного фазного напряжения ($U_{ВХд(1)}$), В	220
Индуктивность источника питания ($L_{ВХ}$), мкГн	0,1...2
Коэффициент сдвига преобразователя ($k_{c(1)}$)	1
Номинальная мощность нагрузки ($P_{Нном}$), кВт	12,5
Диапазон изменения мощности нагрузки	1...4
Номинальное выходное напряжение выпрямителя ($U_{Dном}$), В	650

Таблица 2

Максимально допустимые показатели

Коэффициент гармоник входного тока ($K_{ГВХ}$), %	< 5
Коэффициент гармоник тока преобразователя ($K_{ГП}$), %	< 70
Коэффициент гармоник напряжения конденсатора ($K_{ГУC}$), %	< 0,3
Коэффициент установленной мощности конденсаторов фильтра ($k_{Q,C}$), %	< 5

Преобразователь работает с коэффициентом модуляции приблизительно равным

$$m_{\text{мод}} \approx 2\sqrt{2} \frac{U_{ВХд(1)}}{U_{Dном}},$$

$$m_{\text{мод}} = 2\sqrt{2} \frac{220}{650} = 0,96.$$

При такой величине коэффициента модуляции приведенные интегральные коэффициенты гармоник напряжения преобразователя равняются:

$$\overline{K}_{ГУП\text{пр}}^{(1)} = 533 \cdot 10^{-3},$$

$$\overline{K}_{ГУП\text{пр}}^{(2)} = 27 \cdot 10^{-3},$$

$$\overline{K}_{ГУП\text{пр}}^{(3)} = 7 \cdot 10^{-3}.$$

Указанные числовые значения приведенных коэффициентов гармоник получены подстановкой амплитуд гармоник фазного напряжения преобразователя в выражение (4) с умножением результата на коэффициент запаса $k_3 = 1,1$. Введение коэффициента запаса связано с ограниченной точностью использованных формул разложения фазного напряжения в ряд Фурье.

Расчет номиналов элементов фильтра выполнен пошагово, результаты приведены в табл. 3. Рассчитанная на шаге 8 минимальная величина индуктивности реактора демпфирующей цепи l_B оказалась соизмеримой с величиной индуктивности источника питания l_{BX} и с целью избежать возможные резонансные явления при изменении индуктивности l_{BX} увеличена до $l_B = 7$ мкГн. Имитационное моделирование в программе Simulink показало, что при рассчитанных параметрах фильтра коэффициенты гармоник токов и напряжений не превышают установленных максимальных значений во всем диапазоне изменения нагрузки.

Таблица 3

Номиналы элементов фильтра

Индуктивность реактора фильтра (l_Φ), мкГн	53
Емкость конденсатора фильтра (c_Φ), мкФ	1
Индуктивность разделительного реактора (l_p), мкГн	225
Индуктивность реактора демпфирующей цепи (l_B), мкГн	7
Сопrotивление демпфирующего резистора (r_B), Ом	7,2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика позволяет рассчитывать номиналы элементов входного фильтра по стандартным показателям несинусоидальных искажений токов и напряжений. Методика применима к широкому классу импульсных преобразователей переменного напряжения с высокочастотным широтно-импульсным регулированием, а также к преобразователям, реализуемым по модульному принципу построения. Входными данными являются номинальные параметры источника питания, преобразователя и нагрузки, которые доступны даже на первых стадиях проектирования преобразователя. Описанный пример расчета входного фильтра трехфазного трехмодульного активного выпрямителя напряжения показал эффективность и удобство применения методики. В связи с тем, что в основу методики заложены приближенные выражения, рекомендуется проверка результатов имитационным моделированием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEEE Std 519–2014 – IEEE Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. – Revision of IEEE Std 519–1992. – New York: IEEE, 2014. – 29 p. – doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459.
2. Vdovin V.V., Kotin D.A., Pankratov V.V. Parameters determination in the sine filters for AFE converters and VSI with PWM // The 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2014): proceedings, Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2014. – Novosibirsk: IEEE, 2014. – P. 383–386. – doi: 10.1109/EDM.2014.6882553.

3. Zargari N.R., Joos G., Ziogas P.D. Input filter design for PWM current-source rectifiers // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1994. – Vol. 30, iss. 6. – P. 1573–1579. – doi: 10.1109/TIA.1994.350312.
4. Bauer J., Fligl S., Steimel A. Design and dimensioning of essential passive components for the matrix converter prototype // Automatika. – 2012. – Vol. 53, N 3. – P. 225–235. – doi: 10.7305/automatika.53-3.134.
5. Oliveira Filho M.E. de, Sguarezi Filho A.J., Ruppert E. A three-phase to three-phase matrix converter prototype // Revista Controle & Automação. – 2012. – Vol. 23, N 3. – P. 247–262.
6. Damped input filter design of matrix converter / H. She, H. Lin, X. Wang, L. Yue // International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS 2009), 2–5 November 2009. – Taipei: IEEE, 2009. – P. 672–677. – doi: 10.1109/PEDS.2009.5385684.
7. New considerations in the input filter design of a three-phase buck-type PWM rectifier for aircraft applications / M. Silva, N. Hensgens, J. Oliver, P. Alou, O. Garcia, J.A. Cobos // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 17–22 September 2011. – Phoenix, Arizona: IEEE, 2011. – P. 4087–4092. – doi: 10.1109/ECCE.2011.6064325.
8. Liserre M., Blaabjerg F., Hansen S. Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2005. – Vol. 41, iss. 5. – P. 1281–1291. – doi: 10.1109/TIA.2005.853373.
9. Optimal design of AC EMI filters with damping networks and effect on the system power factor / N. Hensgens, M. Silva, J.A. Oliver, J.A. Cobos, S. Skibin, A. Ecklebe // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 15–20 September. – Raleigh, North Carolina: IEEE, 2012. – P. 530–537. – doi: 10.1109/ECCE.2012.6342761.
10. Nussbaumer T., Heldwein M.L., Kolar J.W. Differential mode input filter design for a three-phase buck-type PWM rectifier based on modeling of the EMC test receiver // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2006. – Vol. 53, iss. 5. – P. 1649–1661. – doi: 10.1109/TIE.2006.881988.
11. Modeling, simulation and design of input filter for matrix converters / A. Popovici, V. Popescu, M. Babaita, D. Lascu, D. Negoiescu // WSEAS International Conference on Dynamical Systems and Control, 2–4 November, 2005. – Venice, Italy: [s. n.], 2005. – P. 439–444.
12. Зиновьев Г.С. Силовая электроника. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2014. – 667 с.
13. Зиновьев Г.С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентильных преобразователей. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1990. – 220 с.
14. Caris M.L.A., Huisman H., Duarte J.L. Theoretical analysis of the duality principle applied to interleaved topologies // International Power Electronics Conference (IPEC–Hiroshima 2014 – ECCE–ASIA), 18–21 May 2014. – Hiroshima: IEEE, 2014. – P. 2954–2959. – doi: 10.1109/IPEC.2014.6870103.
15. Casablanca C., Sun J. Interleaving and harmonic cancellation effects in modular three-phase voltage-sourced converters // IEEE Workshops on Computers in Power Electronics, COMPEL'06, 16–19 July 2006. – Troy, New York: IEEE, 2006. – P. 275–281. – doi: 10.1109/COMPEL.2006.305626.
16. Impact of interleaving on AC passive components of paralleled three-phase voltage-source converters / D. Zhang, F. Wang, R. Burgos, L. Rixin, D. Boroyevich // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2010. – Vol. 46, iss. 3. – P. 1042–1054. – doi: 10.1109/TIA.2010.2045336.
17. Control of circulating current in two parallel three-phase boost rectifiers / Z. Ye, D. Boroyevich, J. Choi, F.C. Lee // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2002. – Vol. 17, iss. 5. – P. 609–615. – doi: 10.1109/TPEL.2002.802170.

Горбунов Роман Леонидович, аспирант кафедры промышленной и медицинской электроники Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основные направления научных исследований: силовая электроника, импульсные преобразователи переменного напряжения, электроприводы переменного тока. Имеет более 10 публикаций. E-mail: romangorbunov91@gmail.com

Макаров Денис Владимирович, кандидат технических наук, доцент Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: силовая электроника, преобразователи электрической энергии, системы генерирования и накопления электрической энергии, активные силовые фильтры. Имеет более 30 публикаций. E-mail: armature.current@gmail.com

An input filter design technique for an AC switching converter*

R.L. GORBUNOV¹, D.V. MAKAROV²

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation, post-graduate student. E-mail: romangorbunov91@gmail.com

² Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: armature.current@gmail.com

In this paper a design technique of a single stage low-pass input filter is proposed. The technique is applicable to high-frequency AC switching converters. The advantage of the proposed technique is that standard voltage and current distortion factors are used, namely a total harmonic distortion factor and a single harmonic distortion factor. The technique is based on a switching converter presented in the form of an equivalent nonsinusoidal current or voltage source. Using direct methods of analyzing switching converter energy efficiency, simplified analytical relations between filter element current and voltage distortion level, filter parameters, switching frequency and relative integral factors of converter current and voltage were derived. Due to this approach the technique is applicable to a wide range of switching converters with various control techniques as well as to converters with a modular structure. Passive damping by means of a series resistive-inductive damping network was also considered and it was concluded that with optimal network parameters the level of input current harmonic attenuation was mainly determined by damping network parameters. The damping network design is included in the technique. The technique is presented in the form of an algorithm but is not iterative. There is an example of an input filter design for three-phase three-module interleaved active front-end voltage rectifier with SPWM. Calculation results were verified by computer simulation of the converter with an input filter in Matlab Simulink.

Keywords: input filter, AC converter, high-frequency control, design technique, total harmonic distortion factor, single harmonic distortion factor, converter with a modular structure, passive damping

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-94-112

REFERENCES

1. *IEEE Std 519–2014 – IEEE Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems*. Rev. of IEEE Std 519–1992. New York, IEEE, 2014. 29 p. doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459
2. Vdovin V.V., Kotin D.A., Pankratov V.V. Parameters determination in the sine filters for AFE converters and VSI with PWM. *The 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2014): proceedings*, Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2014. Novosibirsk, 2014, pp. 383–386. doi: 10.1109/EDM.2014.6882553
3. Zargari N.R., Joos G., Ziogas P.D. Input filter design for PWM current-source rectifiers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1994, vol. 30, iss. 6, pp. 1573–1579. doi: 10.1109/TIA.1994.350312
4. Bauer J., Fligl S., Steimel A. Design and dimensioning of essential passive components for the matrix converter prototype. *Automatika*, 2012, vol. 53, no. 3, pp. 225–235. doi: 10.7305/automatika.53-3.134
5. Oliveira Filho M.E. de, Sguarezi Filho A.J., Ruppert E. A three-phase to three-phase matrix converter prototype. *Revista Controle & Automação*, 2012, vol.23, no. 3, pp. 247–262.
6. She H., Lin H., Wang X., Yue L. Damped input filter design of matrix converter. *International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS 2009)*, Taipei, 2–5 November 2009, pp. 672–677. doi: 10.1109/PEDS.2009.5385684
7. Silva M., Hensgens N., Oliver J., Alou P., Garcia O., Cobos J.A. New considerations in the input filter design of a three-phase buck-type PWM rectifier for aircraft applications. *IEEE Energy*

* Received 18 May 2015.

Conversion Congress and Exposition (ECCE), Phoenix, Arizona, 17–22 September 2011, pp. 4087–4092. doi: 10.1109/ECCE.2011.6064325

8. Liserre M., Blaabjerg F., Hansen S. Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, vol. 41, iss. 5, pp. 1281–1291. doi: 10.1109/TIA.2005.853373

9. Hensgens N., Silva M., Oliver J.A., Cobos J.A., Skibin S., Ecklebe A. Optimal design of AC EMI filters with damping networks and effect on the system power factor. *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Raleigh, North Carolina, 15–20 September, pp. 530–537. doi: 10.1109/ECCE.2012.6342761

10. Nussbaumer T., Heldwein M.L., Kolar J.W. Differential mode input filter design for a three-phase buck-type PWM rectifier based on modeling of the EMC test receiver. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, vol. 53, iss. 5, pp. 1649–1661. doi: 10.1109/TIE.2006.881988

11. Popovici A., Popescu V., Babaita M., Lascu D., Negoitescu D. Modeling, simulation and design of input filter for matrix converters. *WSEAS International Conference on Dynamical Systems and Control*, Venice, Italy, November 2–4, 2005, pp. 439–444.

12. Zinov'ev G.S. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. 5th ed., rev. and enl. Moscow, Yurait Publ., 2014. 667 p.

13. Zinov'ev G.S. *Pryamye metody rascheta energeticheskikh pokazatelei ventil'nykh preobrazovatelei* [Direct methods of switching converters energy efficiency analysis]. Novosibirsk, NSTU Publ., 1990. 220 p.

14. Caris M.L.A., Huisman H., Duarte J.L. Theoretical analysis of the duality principle applied to interleaved topologies. *International Power Electronics Conference (IPEC–Hiroshima 2014 – ECCE–ASIA)*, Hiroshima, 18–21 May 2014, pp. 2954–2959. doi: 10.1109/IPEC.2014.6870103

15. Casablanca C., Sun J. Interleaving and harmonic cancellation effects in modular three-phase voltage-sourced converters. *IEEE Workshops on Computers in Power Electronics, COMPEL'06*, Troy, New York, 16–19 July 2006, pp. 275–281. doi: 10.1109/COMPEL.2006.305626

16. Zhang D., Wang F., Burgos R., Rixin L., Boroyevich D. Impact of interleaving on AC passive components of paralleled three-phase voltage-source converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, vol. 46, iss. 3, pp. 1042–1054. doi: 10.1109/TIA.2010.2045336

17. Ye Z., Boroyevich D., Choi J., Lee F.C. Control of circulating current in two parallel three-phase boost rectifiers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2002, vol. 17, iss. 5, pp. 609–615. doi: 10.1109/TPEL.2002.802170

УДК 539.3/.6

Контактная задача в анализе динамического поведения сборных роторов турбомашин*

М.А. ДУДАЕВ¹, А.А. ПЫХАЛОВ²

¹ 664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, аспирант. E-mail: dudaev_ma@mail.ru

² 664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: pykhalov_aa@mail.ru

В работе рассматривается проблема динамики сборных роторов современных турбомашин при нестационарных режимах работы. Показана актуальность решения контактной задачи в анализе динамического поведения сборных роторов турбомашин. Жесткость сборного ротора как динамической системы представлена сложной величиной, изменяющейся в процессе раскрутки. Математическая модель динамики сборных роторов построена на основе метода конечных элементов. В работе приведены основные компоненты жесткости сборного ротора, их связь с физическими процессами, характерными для сборных роторных систем; рассмотрены силы, возникающие в сборных роторных системах. Отдельно рассмотрена математическая модель решения контактной задачи теории упругости, укрупненно показан алгоритм ее решения методом конечных элементов. Рассмотрено возбуждение ротора силовыми и моментными дисбалансами дисков, составляющих его конструкцию, а также задание дисбалансов в конечно-элементной модели. Для решения основного уравнения движения системы в методе конечных элементов предложен модифицированный подход численного интегрирования Ньюмарка с приведением матрицы масс, вектора сил и адаптивным временным шагом интегрирования. При этом задача решается относительно неизвестного вектора ускорений на шаге интегрирования по времени. В работе показана тестовая конечно-элементная модель сборного ротора на упругих опорах, имеющая контактные сопряжения в зоне фланцевого соединения вала с диском и используемая для отладки программных алгоритмов, разработанных на базе представленной математической модели. Показаны результаты расчета тестовой модели в виде трех низших форм колебаний и графиков зависимости динамических перемещений на упругих опорах ротора, проведен краткий анализ результатов расчета, а также сравнение критических скоростей сборного ротора и собственных частот колебаний его монолитного аналога.

Ключевые слова: сборный ротор, контактная задача, метод конечных элементов, математическая модель, критическая скорость вращения, динамическое поведение, метод Ньюмарка, переходный процесс, колебания

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-113-129

* Статья получена 30 апреля 2015 г.

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие роторных систем турбомашин основывается на принципах многокаскадности и повышения рабочих параметров [1–3]. При этом основополагающим подходом в определении динамических параметров ротора, в частности критических скоростей (частот) его вращения, остается натурный эксперимент, или гонка его реальных прототипов. Одной из главных причин такого подхода является то, что роторы большинства высоконагруженных турбомашин являются принципиально сборной конструкцией, жесткость которой из-за наличия контактных сопряжений в значительной степени отличается от жесткости монолитного аналога и изменяется в ходе раскрутки ротора. Таким образом, неизвестным остается интерпретация влияния условий сопряжения деталей на динамические параметры роторов современных высоконагруженных и многокаскадных турбомашин. Например, это относится к авиационным газотурбинным двигателям [4, 5] как к наиболее энергоемким механическим системам. Сборная конструкция их роторов отличается большим количеством сопрягаемых деталей и разнообразием конструктивных решений по их сопряжению.

Для решения представленной проблемы требуется проведение подробного инженерного анализа, в особенности изменения критических частот вращения ротора [6], а также учет ряда физических процессов механики деформируемого твердого тела. В частности, к таким процессам относится контактное взаимодействие деталей ротора, гироскопический эффект, влияние на ротор поля центробежных сил и другие. Эти эффекты способствуют изменению критической частоты вращения реального сборного ротора по сравнению с математической моделью его монолитного аналога. Наиболее актуальным в этом случае является изучение опасного приближения критической частоты вращения к диапазону рабочих частот ротора (рис. 1), а также повышение общего уровня его амплитуд колебаний.

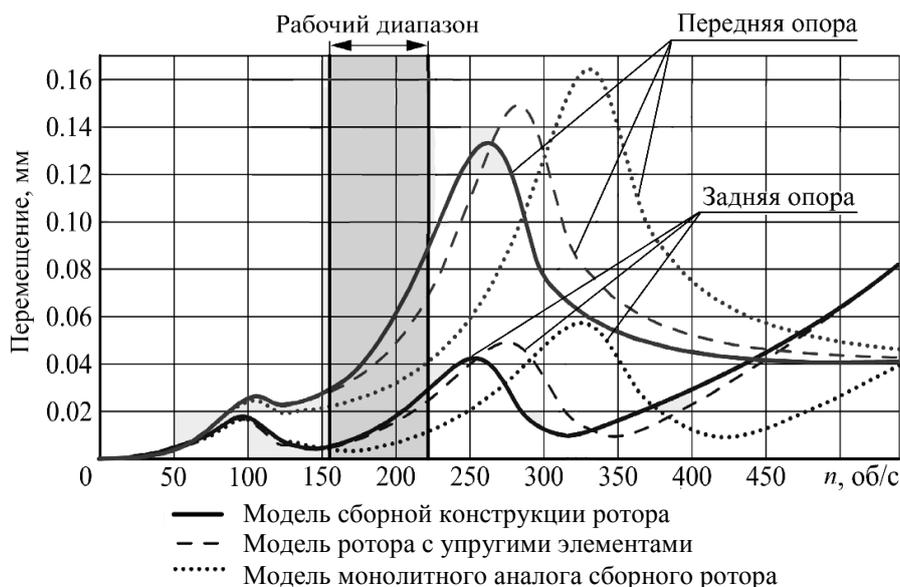


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика роторов

Определенной альтернативой натурному эксперименту (в отношении сокращения материальных и временных затрат при проектировании и доводке конструкции сборного ротора, а также для повышения уровня информативности о его работоспособности) служит развитие теоретических подходов и, соответственно, расчетных методов анализа динамики сборных роторных систем. На сегодняшний день наиболее эффективным из них является метод конечных элементов (МКЭ), использование которого построено с реализацией решения контактной задачи теории упругости [7, 8], позволяющей моделировать и, соответственно, изучать особенности работы тех или иных конструктивных решений сборного ротора, т. е. контактное взаимодействие или условия сопряжения его деталей. Ниже представлена математическая модель и определенные результаты предлагаемого для решения показанной выше проблемы.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Основное уравнение движения упругой системы под действием внешних сил с применением МКЭ имеет вид [7, 8]

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{F\}, \quad (1)$$

где $[M]$ – матрица масс, изменяющаяся с течением времени ввиду изменений инерционных характеристик ротора в ходе раскрутки; $[C]$ – матрица коэффициентов эквивалентного вязкого демпфирования; $[K]$ – матрица жесткости сборной конструкции ротора; $\{\ddot{\delta}\}$, $\{\dot{\delta}\}$ и $\{\delta\}$ – соответственно векторы ускорений, скоростей и перемещений узлов конечно-элементной модели, являющиеся основными неизвестными; $\{F\}$ – вектор внешних сил, приложенных к узлам конечно-элементной модели и являющихся функциями времени.

Матрица жесткости сборного ротора $[K]$ по сравнению с матрицей жесткости монолитного аналога имеет более сложную структуру. Главными ее составляющими являются матрица конструкционной жесткости деталей ротора $[K]_к$ и матрица контактной жесткости $[K]_{\text{конт}}$, используемая для математического моделирования сопряжений деталей. Кроме того, в ней учитывается матрица жесткости от гироскопического эффекта ротора $[K]_г$ и матрица жесткости от начальных напряжений ротора $[K]_σ$:

$$[K] = [K]_к + [K]_{\text{конт}} + [K]_г + [K]_σ. \quad (2)$$

Величины коэффициентов матрицы жесткости сборного ротора изменяются при раскрутке, например, от постепенного увеличения напряжения ротора полем центробежных сил, изменения гироскопического момента, а также от изменения сопряжений от состояния натяга до состояния зазора и наоборот.

Вектор узловых сил включает в себя силы от статического и динамического дисбаланса ротора $\{F\}_д$, силы контактного взаимодействия деталей ротора $\{F\}_{\text{конт}}$, центробежные $\{F\}_ц$ и гравитационные силы $\{F\}_{\text{гр}}$:

$$\{F\} = \{F\}_д + \{F\}_{\text{конт}} + \{F\}_ц + \{F\}_{\text{гр}}. \quad (3)$$

Рассмотрим более подробно компоненты матрицы жесткости согласно уравнению (2).

Матрица конструкционной жесткости $[K]_к$ представляет собой структуру из симметричных, положительно определенных матриц деталей ротора, каждая из которых формируется суммированием из матриц конечных элементов (КЭ) и определяется выражениями [9, 10]

$$[K]_к = \begin{bmatrix} [K]_1 & & & \\ & \dots & & \\ & & [K]_i & \\ & & & \dots \\ & & & & [K]_n \end{bmatrix}; \quad (4a)$$

$$[K]_i = \sum_{j=1}^{Ne} [K]_j^e; \quad (4б)$$

$$[K]_j^e = \int_V |B|^T [D] \cdot |B| dV, \quad (4в)$$

где $[K]_i$ – матрица конструкционной жесткости i -й детали; Ne – количество КЭ, составляющих i -ю деталь; $[K]_j^e$ – матрица жесткости j -го КЭ в детали; $|B|$ – матрица градиентов функций форм КЭ в полярно-цилиндрической системе координат, переводящая вектор узловых перемещений КЭ $u = \{u_r \ u_\theta \ u_z\}^T$ в вектор деформаций $\varepsilon = \{\varepsilon_r \ \varepsilon_\theta \ \varepsilon_z \ \gamma_{r\theta} \ \gamma_{\theta z} \ \gamma_{zr}\}^T$ [9, 10]; $[D]$ – матрица упругих постоянных материала КЭ [11, 12]; $[V]$ – объем КЭ.

Отдельного рассмотрения требует вопрос формирования матрицы контактной жесткости $[K]_{\text{конт}}$, совместно с которой формируется вектор контактных сил $\{F\}_{\text{конт}}$. Сопряжения деталей ротора моделируются специальным типом конечного элемента (рис. 2), который в работах [7, 8] назван контактным элементом сопряжения конструкций – КЭСЖ; при этом для моделирования сопрягаемых деталей используется подход узел-в-узел.

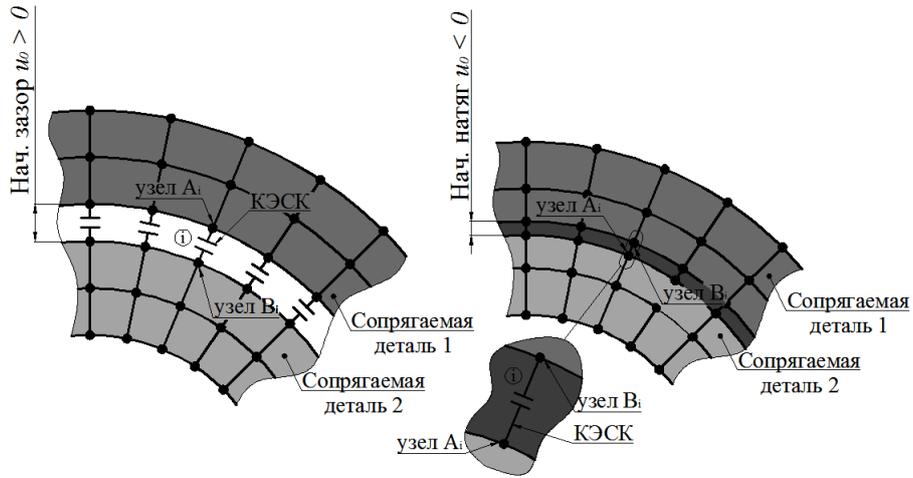


Рис. 2. Моделирование контактного взаимодействия деталей: с зазором (слева) и с натягом (справа)

Исходное состояние контактного элемента характеризуется величиной его начального раскрытия u_{0_i} , устанавливаемого на этапе моделирования. При моделировании натяга $u_{0_i} < 0$ начальное состояние КЭСК – «закрыт», при моделировании зазора $u_{0_i} > 0$ состояние КЭСК – «открыт». В случае моделирования сопряжения по номинальному размеру $u_{0_i} = 0$ КЭСК – «закрыт». В ходе решения системы уравнений МКЭ состояние каждого КЭСК может изменяться от состояния «открыт» до состояния «закрыт» и наоборот, в связи с чем решение задачи проводится итерационно и останавливается на k -й итерации в случае, если состояние большинства или всех КЭСК не изменилось по сравнению с итерацией $k - 1$.

Оценка состояния КЭСК производится на основании анализа невязки (неравенства) поля перемещений его узлов:

$$\Delta u_i = u_{A_i} - u_{B_i} + u_{0_i}, \tag{5}$$

где u_{A_i} и u_{B_i} – перемещения узлов A и B -го КЭСК (рис. 2).

При этом КЭСК «закрыт», если $\Delta u_i \leq 0$, и «открыт», если $\Delta u_i > 0$.

Смена состояний КЭСК в ходе решения обуславливает модификацию глобальной матрицы жесткости $[K]$ прямо в ходе решения за счет добавления в нее матрицы контактной жесткости:

$$[K]_{\text{конт}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{КЭСК}}} \begin{cases} [K]_{\text{КЭСК}}^+, & \Delta u_i > 0, \\ [K]_{\text{КЭСК}}^-, & \Delta u_i < 0, \end{cases} \tag{6}$$

где матрица жесткости открытого КЭСК

$$[K]_{\text{КЭСК}}^+ = \begin{bmatrix} [K]^+ & -[K]^+ \\ -[K]^+ & [K]^+ \end{bmatrix}, [K]^+ = \begin{bmatrix} K_n^+ & 0 \\ & K_\tau^+ \\ 0 & & K_\tau^+ \end{bmatrix}; \quad (7)$$

– закрытого КЭСК:

$$[K]_{\text{КЭСК}}^- = \begin{bmatrix} [K]^- & -[K]^- \\ -[K]^- & [K]^- \end{bmatrix}, [K]^- = \begin{bmatrix} K_n^- & 0 \\ & K_\tau^- \\ 0 & & K_\tau^- \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где K_n^+ и K_τ^+ – жесткость открытого КЭСК в осевом и тангенциальном направлениях соответственно – малая величина, необходимая и достаточная для обусловленности глобальной матрицы жесткости – величина, назначаемая согласно [7, 8] на два-три порядка меньше минимальной жесткости в узлах КЭ детали; K_n^- и K_τ^- – жесткость (штрафная) закрытого КЭСК соответственно в осевом и тангенциальном направлениях – величина, подбираемая согласно [7, 8] на два-три порядка больше максимальной жесткости в узлах КЭ детали.

Вектор контактных сил вычисляется в соответствии с выражениями

$$\{F\}_{\text{конт}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{КЭСК}}} \begin{cases} 0, & \Delta u_i > 0, \\ \{F\}_{\text{конт}i}, & \Delta u_i < 0, \end{cases} \quad (9a)$$

$$\{F\}_{\text{конт}i} = K_n^- \cdot \Delta u_i \{1 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0\}^T. \quad (9б)$$

Контактные силы, приложенные к узлам КЭСК, имеют противоположные знаки и устраняют натяг закрытого КЭСК.

Процедура решения контактной задачи показана на рис. 3 на примере контакта двух пластинчатых элементов. На начальном этапе решения задачи пластины располагаются одна над другой с зазором $u_0 > 0$; перемещения узлов $u_A = u_B = 0$. По формулам (9) имеем $\Delta u > 0$, следовательно, контактный элемент открыт. Жесткость контактного элемента $[K]_{\text{конт}} = \min(K_1, K_2) \cdot 10^{-3}$, контактных сил нет. После решения задачи перемещения узлов $u_A > u_B - u_0$ невязка поля перемещений КЭСК $\Delta u < 0$, что говорит об изменении состояния КЭСК на закрытое. В свою очередь, само по себе изменение состояния КЭСК говорит о необходимости следующего шага решения задачи. Теперь КЭСК считается закрытым, жесткость КЭСК $[K]_{\text{конт}} = \max(K_1, K_2) \cdot 10^3$, модули контактных сил $\{F\}_{\text{конт}} = [K]_{\text{конт}} \cdot |\Delta u|$.

Таким образом, контактные силы выталкивают проникшие друг в друга узлы конечных элементов, а большая жесткость КЭСК обеспечивает совместность деформации конечных элементов моделей сопрягаемых тел под действием внешней нагрузки. После решения задачи на шаге 2 невязка поля перемещений КЭСК $\Delta u \cong 0$ (но все еще меньше нуля ввиду ограниченного значения жесткости КЭСК) и КЭСК находится в закрытом состоянии. Состояние КЭСК после решения не изменилось по сравнению с состоянием в начале расчета текущего шага, следовательно, решение задачи завершено.

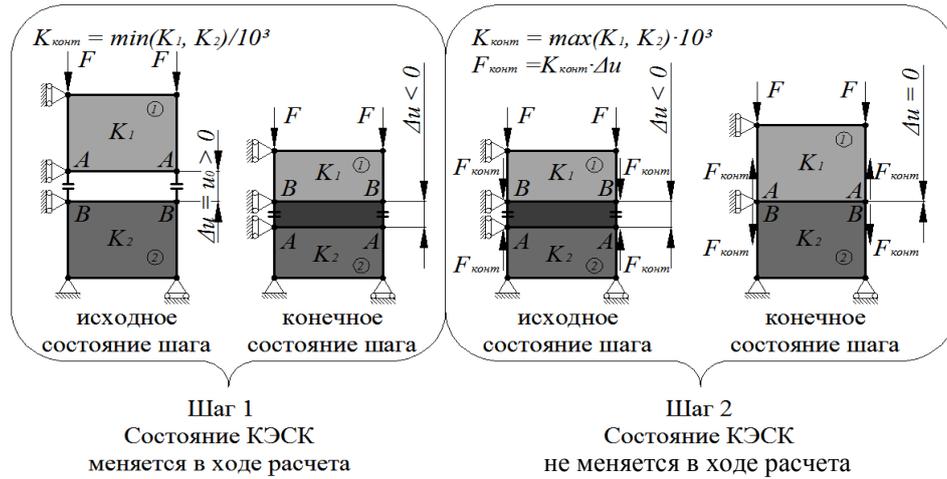


Рис. 3. Укрупненный алгоритм решения контактной задачи

Матрица дополнительной жесткости, обусловленной гироскопическим моментом ротора [7, 13], имеет вид

$$[K]_{\Gamma} = \Omega^2 \left(2 \frac{\omega}{\Omega} - 1 \right) \cdot \begin{bmatrix} \dots & & & \\ & \begin{bmatrix} 0 & \\ & 0 \\ & & m_i \end{bmatrix} & & \\ & & & \dots \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где Ω – угловая скорость прецессии ротора; ω – угловая скорость вращения ротора; m_i – масса, сосредоточенная в i -м узле ротора от сопряженных в этом узле КЭ.

Матрица дополнительной жесткости от начальных напряжений [9, 14] определяется выражениями

$$[K]_{\sigma} = \sum_{i=1}^{Ne} [K]_{\sigma_i}^e; \quad (11a)$$

$$[K]_{\sigma_i}^e = \int_{V_i} |G|_i^T [\sigma]_i |G|_i dV, \quad (11b)$$

где $[K]_{\sigma_i}^e$ – матрица жесткости от начальных напряжений i -го элемента; $|G|_i$ – матрица производных функций форм N конечного элемента в полярно-цилиндрической системе координат:

$$|G|_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial r} I & \frac{\partial N_n}{\partial r} I \\ \left(\frac{N_1}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial N_1}{\partial \theta} \right) I & \dots & \left(\frac{N_n}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial N_n}{\partial \theta} \right) I \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} I & \frac{\partial N_n}{\partial z} I \end{bmatrix}; \quad (12)$$

n – количество узлов конечного элемента; I – единичная матрица (3×3); $[\sigma]_i$ – матрица, составленная из компонент напряжений КЭ:

$$[\sigma]_i = \begin{bmatrix} \sigma_r I & \tau_{r\theta} I & \tau_{rz} I \\ & \sigma_\theta I & \tau_{\theta z} I \\ Sym & & \sigma_z I \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Рассмотрим силы, возбуждающие колебания ротора. Основными из них являются силы и моменты от дисбалансов ротора [5, 8]: статического $D_e = me$, где m – масса ротора, e – радиальный эксцентриситет, и динамического $D_\chi = I\chi$, где I – момент инерции ротора относительно оси симметрии; χ – угловой эксцентриситет. Статический дисбаланс возникает ввиду смещения центра масс ротора от оси вращения (рис. 4, а), динамический – ввиду несовпадения главной оси инерции ротора с осью вращения (рис. 4, б).

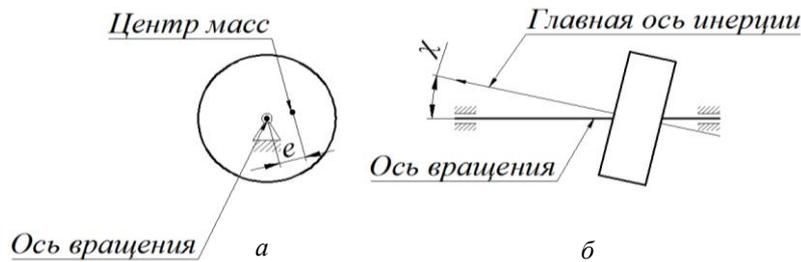


Рис. 4. Дисбалансы ротора

Для задания дисбалансов в модели используется специальный экстраполирующий конечный элемент (рис. 5).

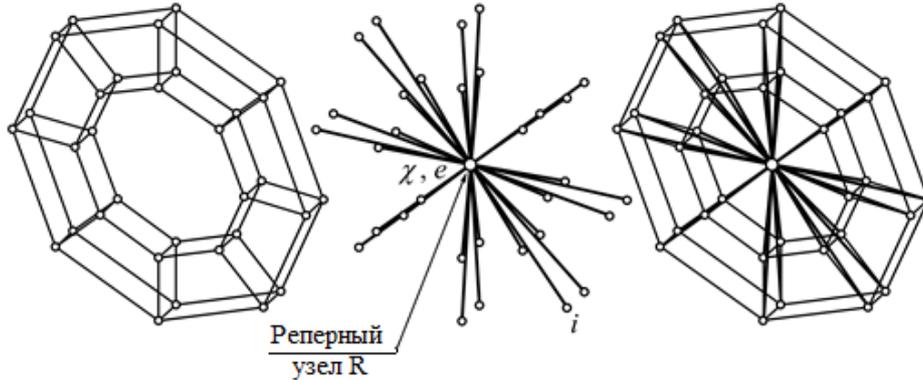


Рис. 5. Моделирование дисбалансов

Указанный элемент соединяет узлы КЭ модели диска ротора с реперным узлом, расположенным строго на оси вращения. Для реперного узла задается статическая и динамическая неуравновешенность, которая пересчитывается на силы, приложенные к узлам диска в соответствии с выражением [8] вида

$$\{F\}_{д_i} = \omega^2 m_i \begin{Bmatrix} -e_i (\sin \varphi_e \cos \theta_i + \cos \varphi_e \sin \theta_i) \\ e_i (\sin \varphi_e \sin \theta_i - \cos \varphi_e \cos \theta_i) \\ \chi_i \cdot r_i (\sin \varphi_\chi \cos \theta_i + \cos \varphi_\chi \sin \theta_i) \end{Bmatrix}, \quad (14)$$

где m_i – масса, сосредоточенная в i -м узле диска от связанных с ним КЭ; e_i и χ_i – эксцентриситеты i -го узла диска:

$$e_i = e_R + (z_i - z_R) \chi_R, \quad \chi_i = \chi_R, \quad (15)$$

φ_e и φ_χ – угловые координаты положения эксцентриситетов e_R и χ_R ; r_i и θ_i – полярные координаты i -го узла диска.

Решение уравнения (1) сводится к его численному интегрированию с применением метода Ньюмарка [7, 8, 15]. Основная идея метода заключается в разделении исследуемого временного интервала переходного режима ротора (T) на малые конечные промежутки времени Δt (рис. 6, а). В таком случае, используя принцип Даламбера, условия динамического равновесия системы строго выполняются лишь в определенные моменты времени t_i , что приводит уравнение (1) к виду

$$[M]_i \{\ddot{\delta}\}_i + [C]_i \{\dot{\delta}\}_i + [K]_i \{\delta\}_i = \{F\}_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (16)$$

где n – количество временных интервалов Δt .

При таком подходе временной интервал Δt должен быть достаточно мал, чтобы достоверно отразить высшую гармонику колебаний ротора. Однако в таком случае на начальном этапе переходного процесса наблюдается излишнее количество точек интегрирования, что существенно увеличивает время счета. В работах [7, 8] доказывается, что для адекватного численного анализа при высоком градиенте интегрируемой функции необходимо исполь-

зовать 12–16 шагов интегрирования на каждый период. В этом случае выгоднее использовать адаптивный временной интервал Δt_i (рис. 6, б).

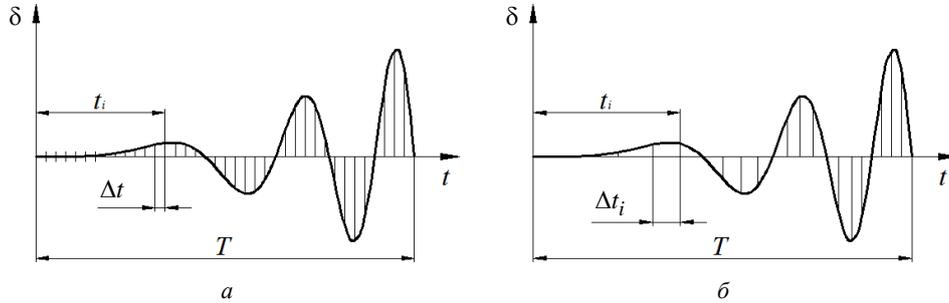


Рис. 6. Постоянный (а) и адаптивный (б) временные шаги интегрирования

Согласно методу Ньюмарка, ускорение в пределах каждого временного отрезка усредняется и считается постоянной величиной (рис. 7).

В таком случае скорости на участке интегрирования изменяются по линейному закону, а перемещения – по параболическому. Классический подход к методу Ньюмарка [15] предполагает сведение трех неизвестных переменных к одной, в качестве которой обычно принимается вектор перемещений текущего шага интегрирования, который находится из уравнения

$$[K]_{\Delta t_i} \{\delta\}_i = \{F\}_{\Delta t_i}, \quad (17)$$

где $[K]_{\Delta t_i}$ – динамическая матрица жесткости:

$$[K]_{\Delta t_i} = [K] + \frac{2}{\Delta t_i} [C] + \frac{4}{\Delta t_i^2} [M]; \quad (18)$$

$\{F\}_{\Delta t_i}$ – динамический вектор сил:

$$\begin{aligned} \{F\}_{\Delta t_i} = & \{F\} + [C] \left\{ \frac{2}{\Delta t_i} \{\delta\}_{i-1} + \{\dot{\delta}\}_{i-1} \right\} + \\ & + [M] \left\{ \frac{4}{\Delta t_i^2} \{\delta\}_{i-1} + \frac{4}{\Delta t_i} \{\dot{\delta}\}_{i-1} + \{\ddot{\delta}\}_{i-1} \right\}. \end{aligned} \quad (19)$$

Предложенная методика является эффективной, однако в некоторых случаях, в частности в случае изменения матрицы масс в ходе раскрутки ротора, более удобным оказывается подход, в котором в качестве основной неизвестной уравнения движения выступает вектор ускорений

$$[M]_{n_i} \{\ddot{\delta}\}_{\text{ср}_i} = \{F\}_{n_i}, \quad (20)$$

где $[M]_{n_i}$ – приведенная матрица масс; $\{F\}_{n_i}$ – приведенный вектор сил.

Выражения для $[M]_{n_i}$ и $\{F\}_{n_i}$ рассматриваются ниже.

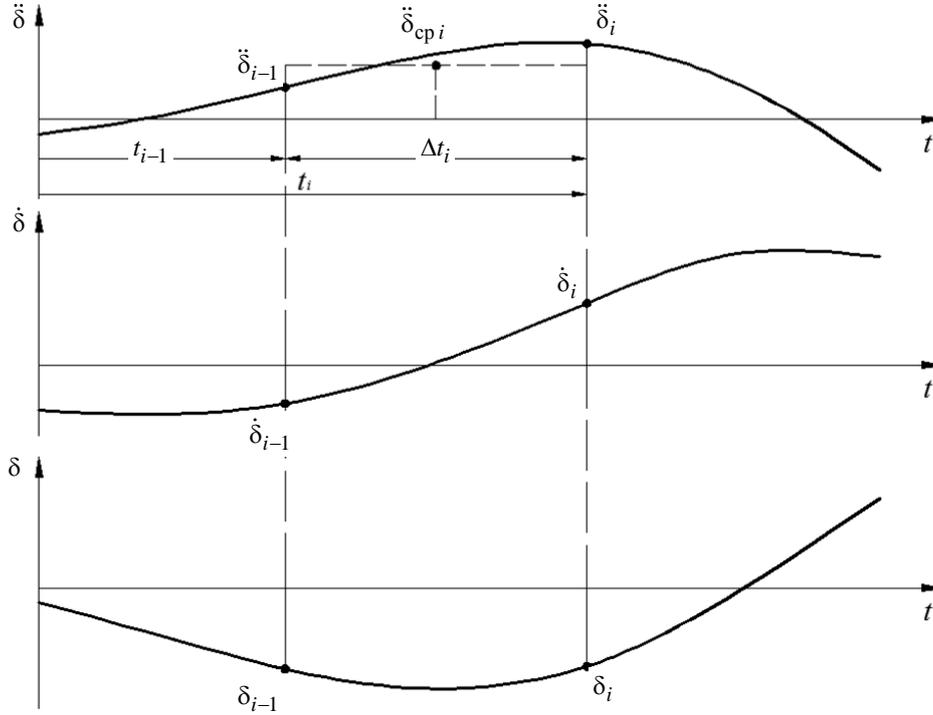


Рис. 7. Аппроксимация параметров движения по методу Ньюмарка

Для реализации указанного подхода на основании дифференциальных зависимостей между скоростями, ускорениями и перемещениями с применением правила интегрирования трапеции (рис. 7) получены выражения

$$\{\ddot{\delta}\}_{\text{ср}i} = \frac{\{\ddot{\delta}\}_i + \{\ddot{\delta}\}_{i-1}}{2}; \tag{21a}$$

$$\{\dot{\delta}\}_i = \{\dot{\delta}\}_{i-1} + \{\ddot{\delta}\}_{\text{ср}i} \Delta t_i; \tag{21б}$$

$$\{\delta\}_i = \{\delta\}_{i-1} + \{\dot{\delta}\}_{i-1} \Delta t + \{\ddot{\delta}\}_{\text{ср}i} \frac{\Delta t_i^2}{2}. \tag{21в}$$

Величины с индексом $i - 1$ считаются известными, поскольку вычислены на предыдущем шаге интегрирования. Если среднее ускорение текущего шага $\{\ddot{\delta}\}_{\text{ср}i}$ вычислено, могут быть рассчитаны и ускорение $\{\ddot{\delta}\}_i$, скорость $\{\dot{\delta}\}_i$ и перемещение $\{\delta\}_i$ текущего шага интегрирования.

Подстановка указанных величин в уравнение движения приводит его к виду

$$[M] \left\{ 2\{\ddot{\delta}\}_{\text{ср}i} - \{\ddot{\delta}\}_{i-1} \right\} + [C] \left\{ \{\dot{\delta}\}_{i-1} + \{\dot{\delta}\}_{\text{ср}i} \Delta t \right\} +$$

$$+[K]\left\{\{\delta\}_{i-1} + \{\dot{\delta}\}_{i-1} \Delta t + \{\ddot{\delta}\}_{\text{ср}i} \frac{\Delta t_i^2}{2}\right\} = \{F\}. \quad (22)$$

После раскрытия скобок имеем

$$\begin{aligned} & 2[M]\{\ddot{\delta}\}_{\text{ср}i} - [M]\{\ddot{\delta}\}_{i-1} + [C]_i\{\dot{\delta}\}_{i-1} + \Delta t[C]_i\{\ddot{\delta}\}_{\text{ср}i} + \\ & + [K]\{\delta\}_{i-1} + \Delta t[K]\{\dot{\delta}\}_{i-1} + \frac{\Delta t_i^2}{2}[K]\{\ddot{\delta}\}_{\text{ср}i} = \{F\}. \end{aligned} \quad (23)$$

Группировка известных значений справа и неизвестных слева дает

$$\begin{aligned} & \left[2[M] + \Delta t[C]_i + \frac{\Delta t_i^2}{2}[K] \right] \{\ddot{\delta}\}_{\text{ср}i} = \\ & = \{F\} + [M]\{\ddot{\delta}\}_{i-1} - \left[[C]_i + \Delta t_i[K] \right] \{\dot{\delta}\}_{i-1} - [K]\{\delta\}_{i-1}. \end{aligned} \quad (24)$$

Таким образом, полученное уравнение имеет вид выражения (20), в котором приведенная матрица масс определяется по формуле

$$[M]_{n_i} = \left[2[M] + \Delta t[C]_i + \frac{\Delta t_i^2}{2}[K] \right], \quad (25)$$

а приведенный вектор сил

$$\{F\}_{n_i} = \{F\} + [M]\{\ddot{\delta}\}_{i-1} - \left[[C]_i + \Delta t_i[K] \right] \{\dot{\delta}\}_{i-1} - [K]\{\delta\}_{i-1}. \quad (26)$$

На основании изложенного подхода проведена программная реализация решателя для динамического анализа сборных роторов. Анализ сходимости решения проводился для каждого типа КЭ и физических процессов, речь о которых шла выше, в отдельности.

2. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В качестве тестовой расчетной модели рассматривается конструкция сборного ротора, показанного на рис. 8.

Ротор установлен на упругие опоры с жесткостью порядка 10^5 Н/мм, что соответствует жесткостям реальных подшипниковых опор [7]. Диск ротора соединяется с валами посредством фланцев. Моделирование стяжных болтов осуществляется с применением КЭ балочного типа. Применение такого подхода обосновано в работе [7]. Поскольку болт в соединении подвергается совместному действию изгиба и сдвига, используется балочная модель Тимошенко [16]. Величина радиального эксцентриситета составляет 0,05 мм, а углового 0,001 рад. Масса ротора в сборе составляет 232 кг.

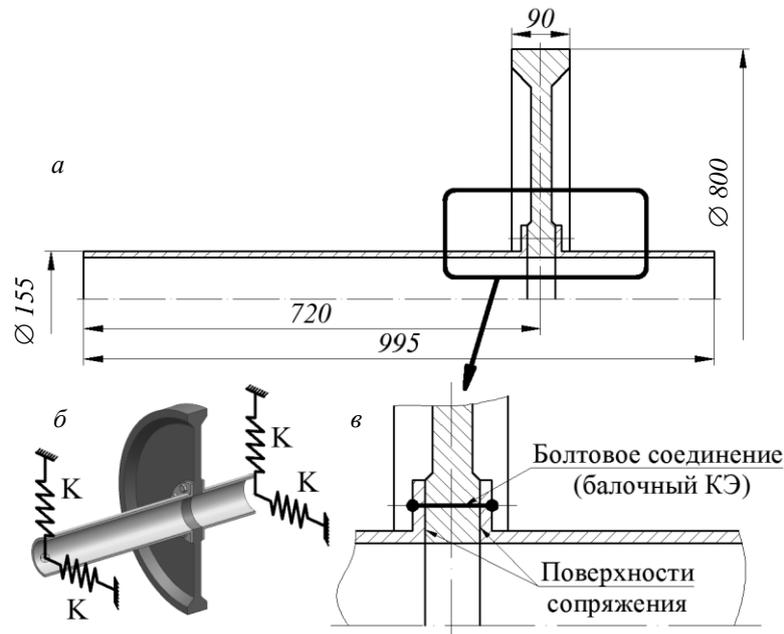


Рис. 8. Тестовая модель сборного ротора:

a – эскиз ротора; *б* – схема закрепления; *в* – сопряжения ротора

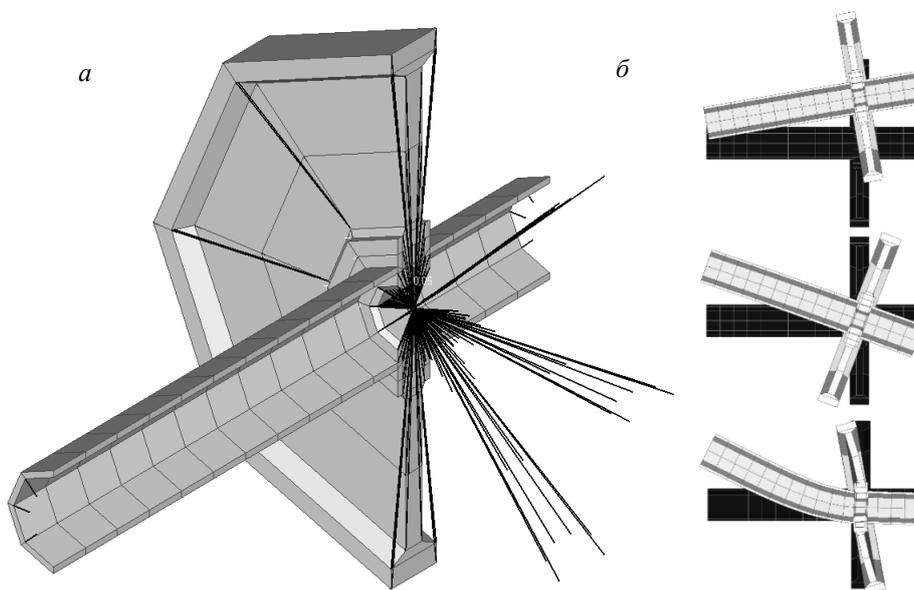


Рис. 9. Конечно-элементная модель сборного ротора (*a*), низшие формы колебаний ротора (*б*)

КЭ модель ротора представлена на рис. 9, *a*. Ротор раскручивается от нуля до 400 об/с с постоянным угловым ускорением 200 об/с². Общее время раскрутки составляет 2 с, а число полных оборотов, совершенных за время раскрутки, равно 400. Подбор расчетного ускорения подробно рассмотрен в работе [8]. Снижение углового ускорения приводит к избыточному количеству

точек интегрирования по времени и увеличивает время счета задачи, а также затрудняет анализ полученных результатов. В свою очередь, чрезмерное завышение величины углового ускорения приводит к потере точности и устойчивости расчета, быстрому прохождению резонансного режима и, как следствие, к заниженным значениям амплитудно-частотной характеристики.

В ходе раскрутки ротор проходит три низшие критические скорости. Им соответствуют формы колебаний, представленные на рис. 9, б. Из них первые две формы обуславливаются податливостью опор, в связи с чем называются «твердотельными» формами колебаний, а третья обусловлена дополнительной податливостью самого вала, в связи с чем называется «изгибной» формой.

В результате расчета получены графики зависимости поступательных перемещений на упругих опорах ротора, представленные на рис. 10, а и б.

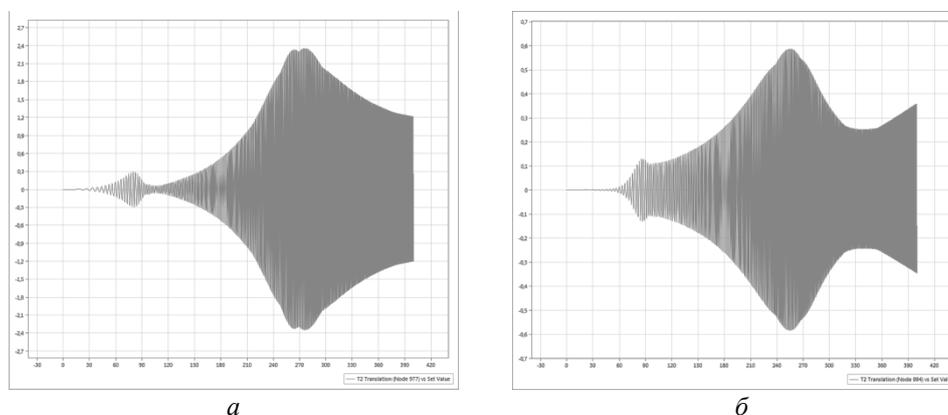


Рис. 10. Диаграммы зависимости динамических перемещений сборного ротора от угловой скорости вращения: передняя опора (а) и задняя опора (б)

При анализе приведенных графиков сложно выявляется прохождение нижней критической скорости, что связано с низкой частотой вращения ротора при этом, и, соответственно, с низкими динамическими нагрузками. Явление резонанса выявляется при снижении углового ускорения раскрутки и «затягивании» прохождения через эту критическую скорость. Полученные низшие критические скорости сборного ротора составляют приблизительно 15 об/с, 80 об/с и 250 об/с. Соответствующие собственные частоты колебаний монолитного аналога ротора, вычисленные с применением математического аппарата извлечения собственных значений матрицы [9, 15], составляют приблизительно 25 Гц, 60 Гц и 280 Гц (см. таблицу).

Критические скорости вращения моделей роторов

Тип конструкции ротора	Критические скорости вращения ротора, об/с (Гц)		
	1-я	2-я	3-я
Сборный	15	80	250
Монолитный	25	60	280

Несмотря на небольшое число поверхностей сопряжения, прослеживаются отличия сборного ротора от его монолитного аналога, указанные в работе [7]. Третья критическая скорость вращения сборного ротора меньше третьей собственной частоты колебаний монолитного ротора и располагается ближе к рабочему диапазону. Увеличение количества поверхностей сопряжения приводит к дальнейшему снижению жесткости сборного ротора и большим различиям в сравнении с результатами расчета монолитного аналога.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ динамического поведения высоконагруженных сборных роторов требует одновременного рассмотрения контактной задачи теории упругости. Предложенный подход к решению задачи планируется применить к роторным системам, состоящим из двух и более роторов, вращающихся с разными угловыми скоростями. Анализ опубликованных работ позволяет предположить, что взаимное влияние таких роторов недостаточно изучено и нуждается в дальнейшем исследовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колотников М.Е. Предельное состояние деталей и прогнозирование ресурса газотурбинных двигателей в условиях многокомпонентного нагружения / под ред. В.М. Чепкина. – Рыбинск: Изд-во РГАТА, 2003. – 136 с.
2. Скубачевский Г.С. Авиационные ГТД, конструкция и расчет деталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 552 с.
3. Хронин Д.В. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1989. – 565 с.
4. Леонтьев М.К. Современные методы расчета динамических характеристик роторных систем. Nastran или Dynamics? // Двигатель. – 2004. – № 3 (33). – С. 14–16.
5. Хронин Д.В. Теория и расчет колебаний в двигателях летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1970. – 412 с.
6. Тимошенко С.П., Янг С.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.
7. Пыхалов А.А. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.05. – М., 2006. – 428 с.
8. Пыхалов А.А., Милов А.Е. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин: монография. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 192 с.
9. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 542 с.
10. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: справочник / В.И. Мяченков, В.П. Мальцев, В.П. Майборода, В.Б. Петров, А.Н. Фролов, С.П. Заякин, Г.И. Ольшанская, В.Б. Горлов, В.С. Бондарь, С.П. Горшков, С.С. Корольков, Ю.В. Жуков, А.В. Цвелих; под общ. ред. М.И. Мяченкова. – М.: Машиностроение, 1989. – 520 с.: ил.
11. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности: учебник для строительных специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1990. – 400 с.: ил.
12. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Машиностроение, 1975. – 500 с.
13. Бабаков И.М. Теория колебаний: учебное пособие. – 4-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2004. – 591 с.
14. NX Nastran. Handbook of nonlinear analysis (solutions 106 and 129). – [S. l.]: Siemens Product Lifecycle Management Software, 2014. – 661 p.
15. Бате К., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов: пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
16. Дудаев М.А. Матрица жесткости балки Тимошенко в конечноэлементном анализе динамического поведения роторных турбомашин // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 6 (89). – С. 59–65.

Дудаев Михаил Алексеевич, аспирант кафедры «Сопrotивление материалов и строительная механика» Иркутского национального исследовательского технического университета. Основное направление научных исследований – метод конечных элементов. Имеет 8 публикаций. E-mail: dudaev_ma@mail.ru.

Пыхалов Анатолий Александрович, доктор технических наук, профессор, кафедра «Сопrotивление материалов и строительная механика» Иркутского национального исследовательского технического университета. Основное направление научных исследований – метод конечных элементов в механике твердого деформируемого тела. Имеет более 120 публикаций. E-mail: pykhalov_aa@mail.ru.

The contact problem in the analysis of the dynamic behavior of modular turbomachine rotors^{*}

М.А. ДУДАЕВ¹, А.А. ПЫХАЛОВ²

¹ *Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontova Street, Irkutsk, 664074, Russian Federation, postgraduate. E-mail: dudaev_ma@mail.ru*

² *Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontova Street, Irkutsk, 664074, Russian Federation, D.Sc. (Eng.), professor. E-mail: pykhalov_aa@mail.ru*

The article is about the dynamics of modern modular turbomachine rotors in transient operation modes. The relevance of solving contact mechanics in the analysis of the dynamic behavior of modular rotors of turbomachines is shown. The stiffness parameter of the modular rotor as a dynamical system is shown as a complex value that is a rotation speed function. The finite elements method is used to build a mathematical model of the modular rotor dynamics. The main stiffness components and forces of the modular rotor, their relation with physical processes characteristic of modular rotor systems are described in the paper. A mathematical model of solving the contact mechanics problem is proposed and a conventional algorithm to solve it using the finite element method is also described. Rotor excitation by force and moment imbalances of disks that make up its structure as well as imbalance modeling using the finite element model are considered. To solve the fundamental motion equation of the system by the finite element method a modified Newmark numerical integration method with a reduced mass matrix, a force vector and an adaptive integration time step is proposed. In so doing the problem is solved relative to an unknown acceleration vector at the time integration step. A test modular rotor finite element model with elastic supports that have contact interfaces in the zone of the shaft flange and disk connection is described. This model can be used for debugging software algorithms developed on the basis of the mathematical model proposed. The test model calculation results given as three minor oscillation forms and charts of dynamic displacements of the rotor in elastic support zones are shown. A brief analysis of the calculation results as well as a comparison of critical speeds of the modular rotor vibration frequency and natural vibration frequency of its monolithic analog is also presented.

Keywords: modular rotor, contact problem, finite element method, mathematical model, critical speed of rotation, dynamic behavior, Newmark method, transient process, vibrations

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-113-129

^{*} *Received 30 April 2015.*

REFERENCES

1. Kolotnikov M.E. *Predel'noe sostoyanie detalei i prognozirovaniye resursa gazoturbinykh dvigatelei v usloviyakh mnogokomponentnogo nagruzheniya* [Limit state of parts and life prediction of gas turbine engines in a multi-component loading]. Rybinsk, RGATA Publ., 2003. 136 p.
2. Skubachevskii G.S. *Aviatsionnye GTD, konstruksiya i raschet detalei* [GTE, construction and calculation of details]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 552 p.
3. Khronin D.V. *Konstruksiya i proektirovaniye aviatsionnykh gazoturbinykh dvigatelei* [The construction and design of aircraft gas turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 565 p.
4. Leont'ev M.K. *Sovremennyye metody rascheta dinamicheskikh kharakteristik rotornykh sistem. Nastran ili Dynamics? [Modern methods of calculation of dynamic characteristics of rotor systems. Nastran or Dynamics?]. Dvigatel' – Engine, 2004, no. 3 (33), pp. 14–16.*
5. Khronin D.V. *Teoriya i raschet kolebanii v dvigatelyakh letatel'nykh apparatov* [Theory and calculation of vibrations in engines of aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 412 p.
6. Timoshenko S.P., Yang S.Kh., Uiver U. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Vibrations in engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.
7. Pyhalov A.A. *Kontaktnaya zadacha staticheskogo i dinamicheskogo analiza sbornykh rotorov turbomashin*. Diss. dokt. tehn. nauk [The contact problem of static and dynamic analysis of modular rotors of turbomachines. Dr. eng. sci. diss.]. Moscow, 2006. 428 p.
8. Pyhalov A.A., Milov A.E. *Kontaktnaya zadacha staticheskogo i dinamicheskogo analiza sbornykh rotorov turbomashin*. Monografiya [The contact problem of static and dynamic analysis of modular rotors of turbomachines. Monograph]. Irkutsk, ISTU Publ., 2007. 192 p.
9. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [The finite element method in the technique]. Moscow, Mir Publ., 1975. 542 p.
10. Myachenkov V.I., Mal'tsev V.P., Maiboroda V.P., Petrov V.B., Frolov A.N., Zayakin S.P., Ol'shanskaya G.I., Gorlov V.B., Bondar' V.S., Gorshkov S.P., Korol'kov S.S., Zhukov Yu.V., Tsvelikh A.V. *Raschety mashinostroitel'nykh konstruksii metodom konechnykh elementov*. Spravochnik [Calculations of engineering structures using finite element method. A Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 520 p.
11. Aleksandrov A.V., Potapov V.D. *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti* [Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 400 p.
12. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. *Teoriya uprugosti* [The theory of elasticity]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 500 p.
13. Babakov I.M. *Teoriya kolebanii* [Theory of vibrations]. 4th ed., rev. Moscow, Drofa Publ., 2004. 591 p.
14. *NX Nastran. Handbook of nonlinear analysis (solutions 106 and 129)*. Siemens Product Lifecycle Management Software, 2014. 661 p.
15. Bathe K.-J., Wilson E.L. *Numerical methods in finite element analysis*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 1976. 528 p. (Russ. ed.: Bate K., Vil'son E. *Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov*. Translated from English. Moscow, Stroiizdat Publ., 1982. 448 p.).
16. Dudaev M.A. *Matritsa zhestkosti balki Timoshenko v konechnoelementnom analize dinamicheskogo povedeniya rotornykh turbomashin* [Timoshenko beam stiffness matrix in finite element analysis of turbomachine dynamic behavior]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2014, no. 6 (89), pp. 59–65.

УДК 004.021

Разработка системы позиционирования и контроля объектов с помощью беспроводной технологии Wi-Fi*

**И.Ю. КУЧИН¹, Ш.Ш. ИКСАНОВ², С.К. РОЖДЕСТВЕНСКИЙ³,
А.Н. КОРЯКОВ⁴**

¹ 414056, РФ, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Астраханский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: ivankuchin2010@gmail.com

² 414056, РФ, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Астраханский государственный технический университет, аспирант. E-mail: astu.org@bk.ru

³ 414056, РФ, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Астраханский государственный технический университет, студент. E-mail: knight_92.92@mail.ru

⁴ 414056, РФ, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Астраханский государственный технический университет, аспирант. E-mail: nimaxwolf@gmail.com

Работа содержит обзор алгоритмов локального позиционирования (позиционирования внутри помещений) на основе стандарта беспроводной связи Wi-Fi, в которых в качестве единственного источника информации о местонахождении агента выступает мощность сигнала, принимаемого мобильным устройством от точек доступа сети Wi-Fi. Приводятся основные характеристики методов анализа позиционно-зависимой информации: метод позиционирования по углу прихода сигнала, по уровню мощности принимаемого сигнала, по времени приема сигнала. Произведен сравнительный анализ рассматриваемых алгоритмов и варианты их реализации. В результате ознакомления с наиболее содержательными работами отечественных и зарубежных ученых по проблеме локального позиционирования были выявлены основные достоинства и недостатки каждой из предложенных методик позиционирования, произведено обобщение недостатков и сделан вывод об оптимальности использования метода определения местоположения мобильного объекта по уровню принимаемого от него сигнала (на основе радиокарты). Данный метод был реализован с применением двух подходов: детерминистского и вероятностного. Авторами формализована задача локальной идентификации по технологии Wi-Fi; сформулированы требования к программно-аппаратному комплексу, осуществляющему локальное позиционирование по технологии Wi-Fi; реализован полностью рабочий прототип автоматизированной системы локальной идентификации. Разработанный прототип был использован для проведения серии экспериментов по определению местоположения и построению маршрута движения мобильного объекта. Практические результаты работы подтвердили недостаточную изученность проблемы позиционирования мобильных объектов у других отечественных и зарубежных авторов. Таким образом, статья поднимает целый ряд научных и технических проблем, требующих более детальной проработки.

* Статья получена 28 мая 2015 г.

Ключевые слова: локальное позиционирование, идентификация, беспроводные сети Wi-Fi, мощность сигнала, анонимность, радиокарта, метод позиционирования по углу прихода сигнала, метод позиционирования по уровню принимаемого сигнала, метод позиционирования по времени приема сигнала, автоматизированная система определения маршрута движения объекта, прослушивание радиоэфира, анализ сетевого трафика

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-130-146

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует множество технических решений задачи определения местоположения физического объекта в пространстве [1–5], которые объединяются под единым термином – системы позиционирования. Все системы позиционирования можно разделить на два класса: глобальные системы позиционирования и локальные, работающие на ограниченной территории.

В последнее десятилетие широкое распространение получили системы глобального позиционирования, такие как GSM, GPS и ГЛОНАСС. К их основным преимуществам можно отнести большую площадь позиционирования (определения местоположения на открытой местности) и достаточно высокую точность (до 2 метров – системы GPS и ГЛОНАСС, до 150 метров – системы GSM) [1].

Однако недостатки, имеющиеся в перечисленных технологиях, не позволяют каждой из них стать универсальной системой для поиска объекта в произвольной локации. К таким недостаткам относятся:

- закрытость данных (крайне ограниченная возможность их получения от государственных и коммерческих структур, которым принадлежат системы);
- слабый сигнал приема систем глобального позиционирования внутри зданий и сооружений (торговые центры, подземные парковки, метро и т. п.) в связи с низким уровнем помехоустойчивости.

Указанные недостатки отсутствуют в системах локального позиционирования (LPS – Local Positioning Systems), а преимущества становятся очевидными в случае необходимости построения систем локации и связи в пределах ограниченной территории (в закрытых помещениях с железобетонными перегородками, тоннелях, подвалах, шахтах, – там, где нет возможности для прямого беспрепятственного распространения радиосигнала), но с высокой точностью, порядка 1-2 метров [2].

Под системой позиционирования в настоящей работе понимается автоматизированная система, обеспечивающая позиционирование объекта в локальной системе координат с отображением его позиции на плане контролируемой территории, оснащенной необходимой инфраструктурой.

При проектировании систем локального позиционирования объекта можно выделить два подхода:

- система строится на основе необходимого дополнительного оборудования;
- система опирается на элементы существующей инфраструктуры, основной задачей которой не является позиционирование.

Методы первой группы требуют развертывания на территории, на которой предполагается осуществлять позиционирование объектов, отдельной

сети приемопередатчиков, осуществляющих связь с носимыми объектами портативными метками или их аналогами.

Более рациональным является использование для позиционирования уже существующего оборудования, именно поэтому в последнее время широкое распространение получили системы позиционирования объектов на основе беспроводной сети Wi-Fi, основной задачей которой является обеспечение передачи данных.

Передача данных осуществляется с помощью радиосигналов, частоты которых зависят от стандарта беспроводной сети. Каждый сигнал несет позиционно зависимую информацию, которую возможно использовать для оценки местоположения объекта.

В последние годы системы локального позиционирования нашли применение в самых разных отраслях и сферах деятельности:

- на промышленных предприятиях для оптимизации работы складов [2];
- на роботизированном производстве, в крупных медицинских учреждениях [3];
- в роли навигационной системы по торговым центрам и промышленным предприятиям [1, 6, 7];
- в маркетинговых исследованиях на основе информации о перемещениях пользователя для более точного анализа рыночной корзины [4].

Помимо этого, системы позиционирования могут найти широкое применение и в сфере безопасности: анализ трафика публичной сети Wi-Fi на предмет наличия в нем противоправной информации (террористическая пропаганда, антиправительственные лозунги, организация несанкционированных митингов и т. п.) вместе с возможностью отслеживания источника его возникновения.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является разработка программно-аппаратного комплекса локального позиционирования объектов, использующих Wi-Fi технологию в реальном времени. Определены следующие задачи для достижения поставленной цели:

- обзор и сравнение различных методик идентификации в сетях Wi-Fi;
- формализация задачи локальной идентификации по технологии Wi-Fi и формирование требований к программно-аппаратному комплексу, осуществляющему локальное позиционирование по технологии Wi-Fi;
- реализация полностью рабочего прототипа автоматизированной системы локальной идентификации.

2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА

В зависимости, прежде всего, от технических возможностей оборудования, используемого для развертывания сетей Wi-Fi, применяется один из следующих (рис. 1) или комбинация вариантов анализа позиционно зависимой информации:

- по углу прихода сигнала (angle of arrival – AOA) – рис. 1, а;

- с помощью уровня (мощности) принимаемого сигнала (received signal strength – RSS) – рис. 1, б;
- основываясь на времени приема сигнала (time of arrival – TOA) – рис. 1, в.

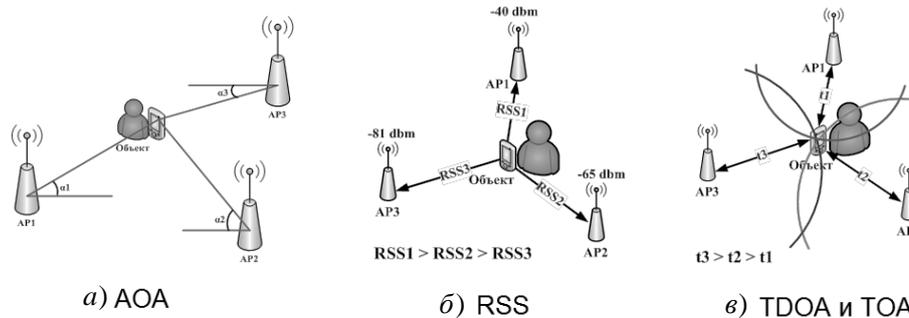


Рис. 1. Типы систем позиционирования

В системах АОА координаты мобильных объектов рассчитываются по гониометрии с помощью направленных антенн или набора антенн, мобильным узлом измеряются углы прихода сигналов от стационарных узлов с известными координатами.

Методы TOA и TDOA основаны на измерении времени распространения сигнала от передатчика до приемника так, чтобы на его основе можно было рассчитать расстояние между передатчиком и приемником. Время распространения вычисляется как разность времен отправки сигнала передатчиком и приема сигнала приемником, для чего требуется очень точная синхронизация часов отправителя и получателя.

3. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ опубликованных результатов работ отечественных и зарубежных исследователей по данному направлению [8–13] показал, что подавляющее большинство из них отдает предпочтение методу позиционирования на основе RSS. Выбор указанного метода, очевидно, связан с тем, что он является наиболее простым в реализации, когда достигаются приемлемые показатели точности (до трех метров).

Работы отечественных авторов в большинстве случаев носят описательно-сравнительный, аналитический характер. В публикации [14] рассмотрена возможность локального позиционирования в беспроводных сетях на основе мощности принимаемого объектом сигнала, приведено математическое описание процедуры перевода мощности принимаемого сигнала в величину расстояния между источником и приемником сигнала, однако не представлена готовая методика позиционирования объекта, а также не приведены результаты экспериментов, которые могли бы эмпирически подтвердить ее состоятельность.

В диссертации отечественного автора В.А. Маслова [10] разработаны методики и алгоритмы решения задач обнаружения, идентификации, позиционирования объектов относительно источников радиосигнала в беспроводных сетях с привязкой к координатам GPS/ГЛОНАСС. Автором планируется

практическое внедрение наработок с целью организации дифференцированного доступа к информационным ресурсам в диспетчерских системах для контроля инженерных коммуникаций. Следует отметить, что в исследовании был предусмотрен ряд упрощений, которые вносят существенное влияние на точность позиционирования. Например, не учитывается влияние различных моделей устройств и точек доступа на мощность принимаемого сигнала. Более того, ни в одной из рассмотренных работ отечественных и зарубежных исследователей не было отмечено, что точка доступа может работать в одном из двух режимов: либо только перехватывать сетевые пакеты, передаваемые по беспроводной сети («слушать эфир»), либо принимать и передавать пакеты для организации обмена информацией с какой-либо сетью, как правило сетью Интернет. Данное замечание является важным с практической точки зрения, поскольку, добившись от точки доступа возможности работать в обоих режимах, удастся совместить функционал позиционирования и обеспечения обмена пакетами с внешними сетями. Это, в свою очередь, позволит расширить область применения беспроводного позиционирования без увеличения затрат на приобретение дополнительного оборудования.

В иностранной литературе рассматриваемой тематике посвящено значительно большее число публикаций, и в целом данное направление исследуется с применением более систематизированного и фундаментального подхода [8, 9].

В работе [8] выдвинуто предложение использовать в экспериментах точки доступа, имеющие направленные антенны, которые могут оценить направление сигнала, поступающего как от других точек доступа, так и от объектов позиционирования. Показано, что даже при невысокой точности измерений и небольшом количестве точек доступа предложенный подход на основе измерения угла прихода сигнала может достичь приемлемой точности (около 4-5 метров). Дальнейшее развитие работы не нашло отражения в научных публикациях авторов, а полученные погрешности хоть и являются приемлемыми для определения положения объекта, но не позволяют строить правдоподобный маршрут движущегося объекта.

В другой работе [9] предложен гибридный метод по определению положения объекта, реализуемый в два этапа:

- 1) на основании измерения мощности сигнала определяется приблизительный набор координат, где может располагаться объект; полученные данные передаются для анализа на следующий этап метода;

- 2) с помощью портативной камеры, зафиксированной на объекте позиционирования, делаются снимки помещения и отсылаются на сервер обработки данных, где производится сравнение признаков полученного «образа» с признаками эталонов, занесенных в базу данных.

Практические результаты, описанные в статье, позволяют сделать вывод, что данный метод может значительно снизить вероятность ошибки идентификации, однако он имеет несколько недостатков:

- 1) необходимо собрать базу данных образов изображений помещения, в котором планируется осуществлять позиционирование объекта;

- 2) необходимо наличие у каждого объекта позиционирования портативной камеры, которая позволит собирать и отправлять образы изображений на сервер обработки данных;

3) данное решение не является универсальным в связи с необходимостью сбора образов изображений при позиционировании в новом помещении.

Таким образом, проведенный обзор литературы позволяет сделать вывод о том, что, несмотря на многолетние исследования, проблема беспроводного позиционирования в пространстве все еще носит открытый характер, особенно в части практической реализации многочисленных предложенных методик. В настоящее время на рынке отсутствуют доступные системы, позволяющие использовать имеющуюся инфраструктуру сети Wi-Fi для решения задачи позиционирования на локальном объекте (например, в торговом центре, конференц-площадке, кампусе).

4. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ЛОКАЛЬНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Основную задачу, для решения которой проектируется автоматизированная система позиционирования, можно в формализованном виде представить следующим образом. Имеется объект позиционирования O – мобильное устройство, снабженное wi-fi адаптером, причем к O предъявляется единственное требование – wi-fi адаптер должен быть активен (не обязательно подключен к сети). В пределах некоторой заранее определенной зоны Z (локальная система координат на плоскости) развернута инфраструктура wi-fi, представляющая собой совокупность точек доступа AP_i , $i:1..n$, где n – количество точек доступа, при чем в любой точке Z величина отношения «сигнал/шум» для каждой из AP_i , $i:1..n$ больше единицы. Параметры объекта позиционирования O (модель устройства, производитель, MAC-адрес, технические характеристики) заранее не известны, равно как и время и/или траектория появления и движения на плоскости Z . $AP_i(x, y)$ – координаты i -й точки доступа в локальной системе координат неизменны и заранее известны. Основная задача автоматизированной системы позиционирования – выдавать в режиме реального времени (с предопределенным интервалом времени t) координаты O в системе координат Z .

Универсальность автоматизированной системы, которая сможет решить сформулированную выше задачу, заложена в отсутствии ограничений на мобильный объект идентификации – именно такой принцип оправдан современной тенденцией развития беспроводных сетей и рынка мобильных устройств и только при такой постановке задачи подобная система может представлять не только научный, но и коммерческий (прикладной) интерес.

При выборе методов определения местоположения объекта в проектируемой автоматизируемой системе были рассмотрены следующие методы, наиболее часто применяемые на практике:

1) метод идентификации объекта на основе ближайшей точки доступа [14];

2) метод идентификации объекта с помощью модели распространения сигнала [3,15];

3) метод идентификации объекта по радиокarte [16].

Метод (1) прост в реализации и отличается низкой вычислительной сложностью, однако погрешности при его использовании могут достигать дальности трансляции сигнала объектом идентификации (в помещении до

100 метров). Метод (2) требует детального построения модели распространения сигнала для среды распространения радиоволн и для каждой точки доступа, что в конечном счете не гарантирует обеспечения достаточной точности измерений в результате возникновения в помещении таких эффектов, как затухание, отражение и интерференция радиоволн. Моделирование эффектов такого рода для произвольной зоны идентификации представляется сложной вычислительной задачей. Алгоритм приемлем к использованию при глобальной идентификации в GPS/ГЛОНАСС и сотовых сетях, где не столь значительно проявляется влияние помех на позиционно зависимые параметры сигнала.

Метод (3) обеспечивает определение местоположения абонента даже в условиях сложной помеховой обстановки в связи с использованием базы данных измерений мощности передаваемого сигнала, предварительно выполненных в определенных точках пространства (точки калибровки).

В настоящем исследовании в качестве базового метода позиционирования объекта выбран метод идентификации по радиокarte, который, в свою очередь, может быть реализован с применением двух подходов: детерминистского [18] и вероятностного [17].

Для проведения экспериментов была выбрана зона идентификации, в роли которой выступило закрытое помещение с размерами сторон 18 метров и 12 метров. В трех углах помещения в заранее определенных координаторах были установлены wi-fi роутеры, функционирующие в режиме прослушивания эфира.

Согласно [17, 18], метод идентификации объекта по радиокarte состоит из двух этапов: калибровки и определения местоположения. В результате калибровки выбранного помещения была полученная радиокarte, изображенная на рис. 2. В каждой точке калибровки в децибелах указаны средние значения мощности сигнала от соответствующих роутеров – Router1, Router2, Router3.

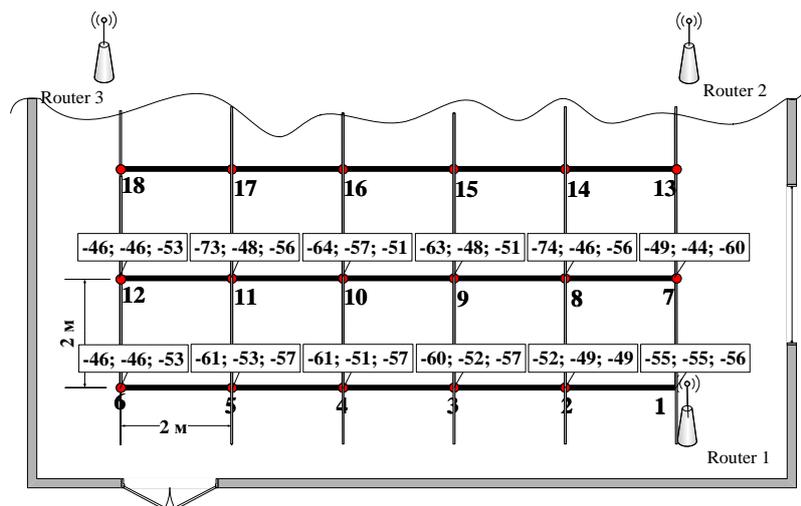


Рис. 2. Часть радиокарты помещения

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

С помощью полученной радиокарты была проведена серия экспериментов, каждый из которых будет рассмотрен далее.

Эксперимент 1. Определение зависимости модели адаптера на результаты локального позиционирования

Для определения мощности сигнала различных мобильных устройств в качестве экспериментальных образцов было выбрано пять устройств с WLAN-интерфейсами: ноутбук, нетбук, два смартфона и планшет. Для выбранных устройств были произведены замеры мощности принимаемого от них сигнала в одних и тех же точках радиокарты. Зависимость принимаемой мощности сигнала от расстояния для смартфонов Samsung Galaxy S2 и Lenovo IS2500 представлена на рис. 3 (количество устройств, отображаемых на графике, уменьшено до двух в целях обеспечения читабельности и легкости восприятия). Линии тренда для различных устройств неодинаковы, что может значительно влиять на погрешности при позиционировании и определении местоположения объекта на карте. Схожие результаты были получены в исследовании [19].

В связи с тем, что программно изменить мощность излучения wi-fi сигнала возможно только на уровне разработчика мобильного устройства, эта опция не является доступной для рядового пользователя. Изображенные на рис. 5 линии тренда для двух устройств формируют «диапазон», в который «укладываются» значения мощности сигналов всех остальных устройств, принимавших участие в эксперименте.

Проведенный эксперимент подтвердил влияние модели беспроводного адаптера как минимум на одну позиционно зависимую характеристику сигнала – мощность. В связи с этим целесообразным является условное установление определенного диапазона мощности сигнала (возможно, полученного эмпирическим путем), который будет являться универсальным для всех мобильных устройств в данных условиях решения задачи позиционирования при создании автоматизированной системы позиционирования.

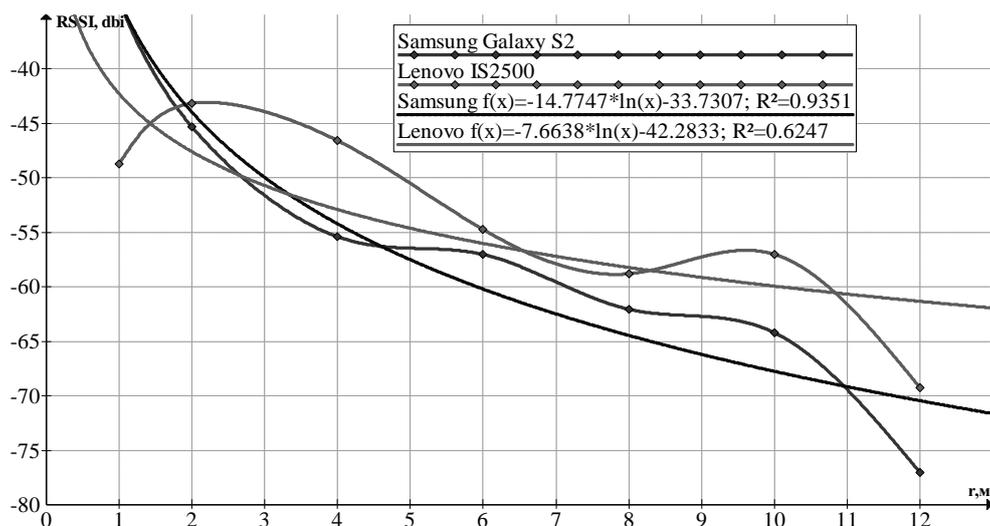


Рис. 3. Зависимость RSSI(r) для двух разных мобильных устройств

Эксперимент 2. Определение зависимости результатов позиционирования от конкретного экземпляра точки доступа wi-fi одной и той же модели

Для развертывания системы позиционирования недостаточно использование одной точки доступа, поэтому возникает проблема синхронного измерения мощности принимаемого сигнала от нескольких точек доступа. Был проведен эксперимент по измерению мощности сигнала wi-fi одного и того же мобильного устройства двумя точками доступа аналогичной модели. Результаты измерений представлены на рис. 4. Построенные линии трендов позволяют сделать вывод о возможности пренебречь разницей в чувствительности идентичных точек доступа при проведении замеров.

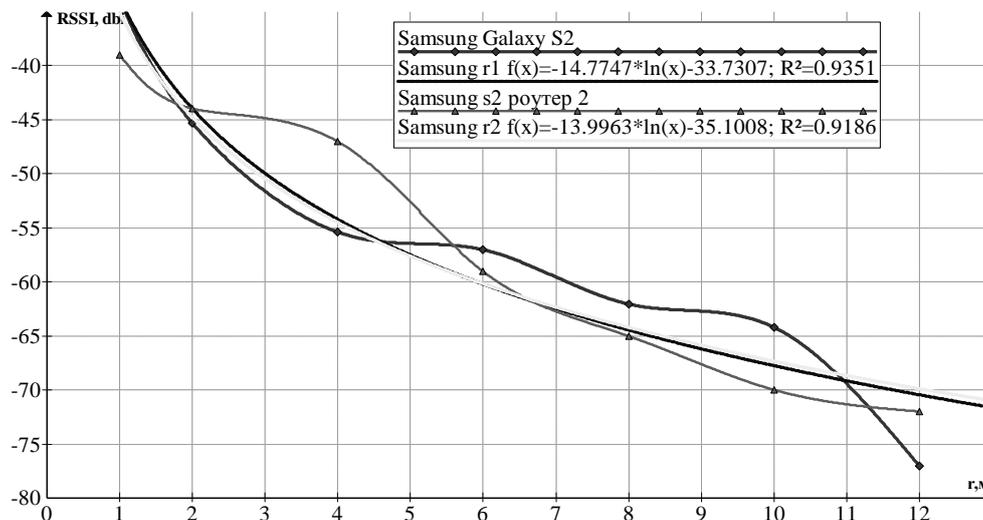


Рис. 4. Уровень принимаемого сигнала для двух точек доступа

Эксперимент 3. Определение оптимального времени калибровки

На этапе калибровки для определения наиболее оптимального интервала времени, необходимого для измерения точной мощности принимаемого сигнала, было посчитано среднее отклонение средних значений мощности сигнала на интервале от эталонной модели зависимости мощности сигнала от расстояния (табл. 1).

Таблица 1

Среднее отклонение

Расстояние между приемником и передатчиком сигнала (метры), x	$F(x)$	Средние значения мощности сигнала на интервале (dBi)			
		20 с	40 с	60 с	90 с
4	-54	-56	-55	-55	-55
5	-57,7	-55	-54	-56	-55
6	-60	-67	-61	-61	-60
7	-62,5	-64	-63	-63	-62

Окончание табл. 1

Расстояние между приемником и передатчиком сигнала (метры), x	$F(x)$	Средние значения мощности сигнала на интервале (dBi)			
		20 с	40 с	60 с	90 с
8	-64,5	-60	-61	-63	-63
9	-66	-64	-59	-64	-65
10	-67,7	-68	-65	-68	-68
11	-69	-67	-70	-70	-70
12	-70,5	-68	-72	-73	-73
Среднее отклонение		2,7	2,4	1,3	1,2

Основываясь на полученных результатах среднего отклонения, оптимальное время калибровки, в течение которого возможно получить приемлемый по достоверности уровень мощности сигнала, составляет 60 секунд. Все дальнейшие измерения мощности сигнала осуществлялись в течение указанного интервала времени.

6. РЕАЛИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

С целью автоматизации процесса позиционирования – обеспечения возможности загрузки плана помещения, обработки калибровочных данных, сбора информации о мощности получаемого сигнала и построения маршрута движения объекта – было разработано программное обеспечение (далее – система).

На рис. 5 представлена контекстная диаграмма системы, основанной на подходе определения местоположения объекта по радиокarte. В данной диаграмме в качестве исходной информации, на основе которой строится система позиционирования, выступает план территории и MAC – адрес идентифицируемых мобильных устройств.

Результатом работы системы является определение маршрута движения объекта. После построения контекстная диаграмма детализируется с помощью диаграммы декомпозиции первого уровня (далее DF-диаграмма). При построении DF-диаграммы исходная декомпозируемая система разбивается на четыре составляющие. DF-диаграмма для рассматриваемой задачи приведена на рис. 6.

Очередность выполнения этапов для решения рассматриваемой задачи следующая:

- составление радиокарты;
- получение значений RSS от точек доступа;
- анализ полученных значений RSS и значений точек калибровки;
- отображение точками объекта на плане.

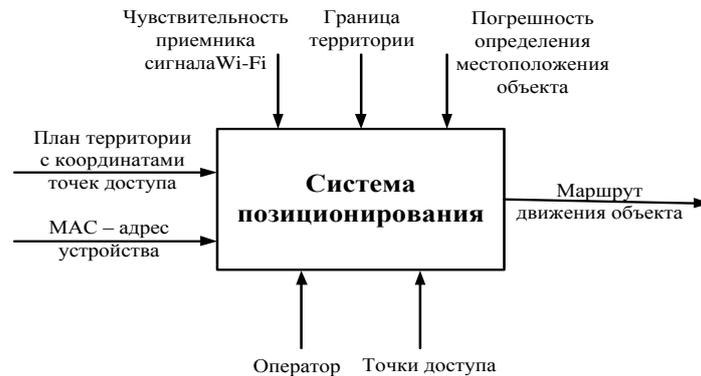


Рис. 5. Контекстная диаграмма «Система позиционирования»

В результате выполнения блока «Составление радиокарты» получаем совокупность точек калибровки, размещенных на указанном плане и содержащих значения мощности сигнала объекта позиционирования, полученные роутерами.

Результатом работы блока «Получение значений RSS от точек доступа» является множество значений мощности сигнала указанного объекта.

Блок «Анализ полученных значений RSS и значений точек калибровки» предназначен для получения координат движения объекта, которые в режиме реального времени отображаются на плане территории и/или сохраняются в базу данных для последующего анализа.

Результатом работы блока «Отображение точками объекта на плане» является маршрут движения объекта, прокладываемый на карте как в режиме реального времени, так и за интересующий оператора промежуток времени.

С использованием разработанного программно-аппаратного комплекса, в состав которого вошло программное обеспечение и три идентичные точки доступа, была составлена радиокарта (см. рис. 2) и проведены эксперименты по определению маршрутов движения объектов. В качестве мобильного устройства использовался мобильный телефон Samsung Galaxy S2 в режиме точки доступа, способный постоянно посылать широковещательные пакеты с помощью wi-fi сигнала.



Рис. 6. DF-диаграмма

На рис. 7 крупной пунктирной линией обозначен реальный маршрут движения объекта. Замеры мощности сигнала мобильного устройства проводились в течение времени, равного 5 секундам, достаточного для определения мощности сигнала объекта с учетом нормализации сигнала в точках калибровки № 4, 10, 16, 22, 28, 34, 40, 46, 52. К полученным значениям было применено два подхода вычисления координат объекта: детерминистский и вероятностный. Мелкой пунктирной линией обозначен маршрут движения, полученный с помощью детерминистского подхода, сплошной линией – вероятностного.

Абсолютные отклонения от реального маршрута представлены в табл. 2.

Таблица 2

Отклонения от реального маршрута

Отклонение от реального маршрута в заранее заданных точках калибровки, м										Среднее отклонение, м
Точки калибровки, №	4	10	16	22	28	34	40	46	52	
Евклидово расстояние	1,8	2,2	2,4	2,5	2,3	2,4	2,1	2,2	3,8	2,4
Вероятностное распределение Байеса	0	1,2	2,2	0,4	1,6	1,8	0,3	1,9	1,4	1,04

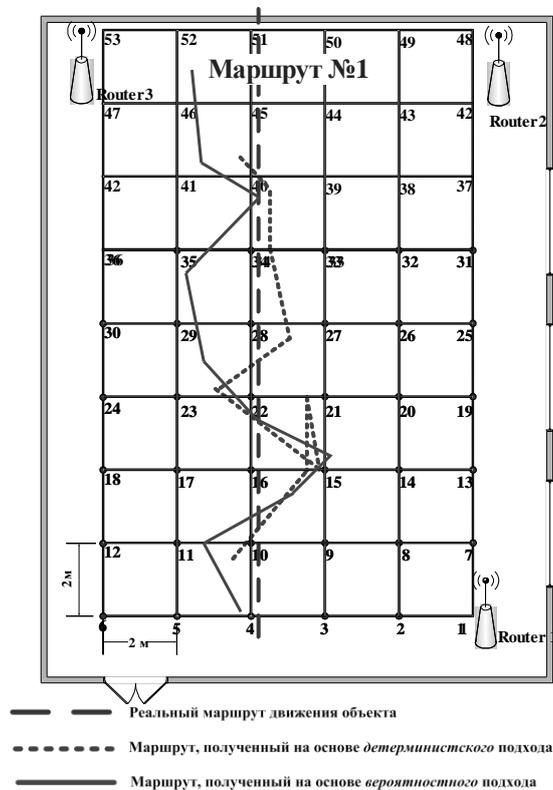


Рис. 7. Определение маршрута движения объекта

Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод о применимости обоих подходов для решения локальной задачи позиционирования объекта. Точность определения объекта позиционирования на плоскости с помощью радиокарты не превышает 2,5 метров, что сопоставимо с рыночными системами позиционирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе впервые формализована задача локальной идентификации по технологии wi-fi с учетом реальных требований, которые могут быть предъявлены в случае коммерческого использования.

Для создания первого полностью функционального прототипа системы авторы пошли на следующее упрощение: выбран ограниченный диапазон возможной мощности сигнала мобильного устройства на основании данных пяти различных производителей. Очевидно, что данный вопрос требует дальнейшего изучения для получения корректных координат при отслеживании мобильного устройства произвольного производителя.

Предложенная формализация задачи локальной идентификации по технологии wi-fi поднимает целый ряд научных и технических задач, требующих следующих решений:

- совмещения функционала точки доступа wi-fi для одновременного позиционирования объекта и обеспечения обмена пакетами с внешними сетями;
- совмещения методов идентификации AOA, TOA и RSS для повышения точности без искусственного удорожания беспроводной инфраструктуры;
- выбора оптимального варианта размещения точек доступа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bahl P., Padmanabhan V.* RADAR: An In-building RF-based user location and tracking system // Proceedings of IEEE INFOCOM 2000, Tel-Aviv, Israel, March 2000. – Tel-Aviv: IEEE, 2000. – Vol. 2. – P. 775–784.
2. A friis-based calibrated model for Wi-Fi terminals positioning / F.A. Lassabe, P. Canalda, P. Chatonnay, F. Spies, O. Baala // Proceedings of Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. WoWMoM 2005, Giardini Naxos, Italy, 13–16 June 2005. – Los Alamitos, California: IEEE, 2005. – P. 382–387.
3. *Kupper A.* Location-based services. – Chichester, England; Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2005. – 365 p.
4. *Пан К.С., Цымблер М.Л.* Параллельный алгоритм решения задачи анализа рыночной корзины на процессорах Cell // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. – 2010. – № 16 (192). – С. 48–57.
5. *Попов Г.А., Белов С.В.* Некоторые задачи формализации процесса анализа физической защиты объекта информации // Новые информационные технологии в региональной инфраструктуре и образовании, НИТРО–2001: материалы четвертой международной научно-методической конференции, Астрахань, 24–29 сентября 2001 г. – Астрахань: АГТУ, 2001. – С. 59–62.
6. *Bensky A.* Wireless positioning technologies and applications. – Boston, Massachusetts: Artech House, 2008. – 305 p.
7. *Аникин А.В.* Определение местоположения мобильного объекта с помощью приемопередатчиков nanoLOC фирмы Nanotron // Беспроводные технологии. – 2007. – № 3. – С. 38–41.
8. *Rong P., Sichitiu M.L.* Angle of arrival localization for wireless sensor networks // 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks:

Secon'06, Reston, Virginia, USA, 25–28 September 2006. – Piscataway, New Jersey: IEEE, 2006. – Vol. 1. – P. 374–382.

9. A hybrid method for indoor user localization / M. Redzic, C. O'Conaire, C. Brennan, N. O'Connor // Adjunct Proceedings of the 4th European Conference on Smart Sensing and Context, EuroSSC 2009, Guildford, United Kingdom, 16–18 September 2009. – Guildford: [s. n.]. – P. 25–28.

10. Маслов В.А. Модели и алгоритмы идентификации и позиционирования мобильных средств связи в системах поддержки принятия решений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пенза, 2011. – 20 с.

11. Исследование возможности локального позиционирования в беспроводных сетях IEEE 802.15.4 / А.В. Поникар, О.В. Евсеев, В.Е. Анциперов, Г.К. Мансуров // Материалы IV Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь», Москва, 29 ноября – 3 декабря 2010 г. – М., 2010. – С. 914–918.

12. Квятковская И.Ю., Фам К.Х. Система показателей оценки качества телекоммуникационных услуг и метод их оценки // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2013. – № 2. – С. 98–103.

13. Лосев Н.Н., Дмитриев В.Н. Анализ производительности протоколов уровня доступа к среде в беспроводных локальных сетях // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2011. – № 2. – С. 126–131.

14. Минахметов Р.М., Рогов А.А., Цымблер М.Л. Обзор алгоритмов локального позиционирования для мобильных устройств // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2013. – № 2. – С. 83–96.

15. Кучин И.Ю. Защита конфиденциальности персональных данных с помощью обезличивания // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2010. – № 2. – С. 158–162.

16. Курдин В.А., Шаранов А.П. Методы позиционирования абонентов внутри помещений, основанные на радиоотпечатках (location fingerprinting methods) // Вычислительные сети. Теория и практика. – 2012. – № 2 (21). – С. 1–8.

17. A probabilistic approach to WLAN user location estimation / T. Roos, P. Myllymaki, H. Tirri, P. Misikangas, J. Sievanen // International Journal of Wireless Information Networks. – 2002. – N 9. – P. 155–163.

18. Курдин В.А., Шаранов А.П. Определение местонахождения абонента в системе радиодоступа стандарта DECT с помощью методов статистического анализа // Труды XVI Международной научно-технической конференции «Информационные средства и технологии», Москва, 21–23 октября 2008 года: в 3 т. – М., 2008. – Т. 1. – С. 58–61.

19. A comparison of affine region detectors / K. Mikolajczyk, T. Tuytelaars, C. Schmid, A. Zisserman, J. Matas, F. Schaffalitzky, T. Kadir, L. Gool // International Journal of Computer Vision. – 2005. – N 65 (1). – P. 43–72.

Кучин Иван Юрьевич, кандидат технических наук, доцент Астраханского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: безопасность вычислительных сетей, wi-fi идентификация, Data Mining. Имеет более 10 публикаций. E-mail: ivankuchin2010@gmail.com

Иксанов Шамиль Шавкетович, аспирант, ассистент кафедры «Информационная безопасность» Астраханского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: клеточные автоматы, wi-fi идентификация. Имеет 3 публикации. E-mail: astu.org@bk.ru

Рождественский Сергей Константинович, студент кафедры «Информационная безопасность» Астраханского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – wi-fi идентификация. Не имеет публикаций. E-mail: knight_92.92@mail.ru

Коряков Александр Николаевич, аспирант кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления» Астраханского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – wi-fi идентификация. Не имеет публикаций. E-mail: nimaxwolf@gmail.com

Development of positioning and object control facilities by using Wi-Fi technologies *

I.Yu. KUCHIN¹, Sh.Sh. IKSANOV², S.K. ROZHDESTVENSKIY³, A.N. KORYAKOV⁴

¹Astrakhan State Technical University, 16, Tatischeva Street, Astrakhan, 414056, Russian Federation, PhD (Eng.). E-mail: ivankuchin2010@gmail.com

²Astrakhan State Technical University, 16, Tatischeva Street, Astrakhan, 414056, Russian Federation, postgraduate student. E-mail: astu.org@bk.ru

³Astrakhan State Technical University, 16, Tatischeva Street, Astrakhan, 414056, Russian Federation, student. E-mail: knight_92.92@mail.ru

⁴Astrakhan State Technical University, 16, Tatischeva Street, Astrakhan, 414056, Russian Federation, postgraduate student. E-mail: nimaxwolf@gmail.com

The work provides an overview of local positioning algorithms (indoor positioning) based on the wireless standard Wi-Fi in which the only source of information on the whereabouts of the agent is the power of a signal received from the access points of the Wi-Fi network. The basic characteristics of the methods of analysis of the position-dependent information are presented in the article such as a method of positioning by the angle of arrival, a method of positioning by the received signal strength and a method of positioning by the time of arrival. A comparative analysis of the considered algorithms is made and some ways of their implementation are proposed. Investigations conducted by Russian and foreign researchers on the issue of local positioning revealed the major advantages and disadvantages of each of the proposed methods of positioning. As a result, the authors made an analysis of drawbacks and made a conclusion that an optimal use of the method of the localizing a mobile object was the method of positioning by the received signal strength (based on a radio map). This method was implemented using two approaches, namely, the deterministic and probabilistic approaches. The authors have formalized the Wi-Fi local problem identification technology. They also formulated the requirements to software and hardware systems responsible for the Wi-Fi local positioning technology and fully implemented a working prototype of an automated system for local authentication. The developed prototype was used to conduct a series of experiments to determine the location and construction of the route of a mobile object. The results revealed that Russian and foreign authors needed a more detailed study of the problem of mobile object positioning. Therefore, the article raises a number of scientific and technical issues that require further study.

Keywords: indoor localization, identification, Wi-Fi, RSSI, anonymity, radio map, method of positioning by the angle of arrival, method of positioning by the received signal strength, method of positioning by the time of arrival, automated system for determining the route of object movement, listening-in the air, analysis of network traffic

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-130-146

REFERENCES

1. Bahl P., Padmanabhan V. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. *Proceedings of IEEE INFOCOM 2000*, Tel-Aviv, Israel, March 2000, vol. 2, pp. 775–784.
2. Lassabe F.A., Canalda P., Chatonnay P., Spies F., Baala O. A friis-based calibrated model for WiFi terminals positioning. *Proceedings of Sixth IEEE International Symposium on a World of*

* Received 18 May 2015.

Wireless, Mobile and Multimedia Networks. WoWMoM 2005, Giardini Naxos, Italy, 13–16 June 2005, pp. 382–387.

3. Kupper A. *Location-based services*. Chichester, England, Hoboken, New Jersey, John Wiley, 2005. 365 p.

4. Pan K.S., Tsymler M.L. Parallel'nyi algoritm resheniya zadachi analiza rynochnoi korziny na protsessorakh Cell [A parallel algorithm for market basket analysis on the cell processor]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye – Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*, 2010, no. 16 (192), pp. 48–57.

5. Popov G.A., Belov S.V. [Some problems formalizing the process of analyzing the physical protection of the object information]. *Novye informatsionnye tekhnologii v regional'noi infrastrukture i obrazovanii, NITRO–2001: materialy chetvertoi mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii* [New information technologies in regional infrastructure and education, NITRE–2001. Materials of IV international scientific and methodological conference]. Astrakhan, 24–29 September 2001, pp. 59–62.

6. Bensky A. *Wireless positioning technologies and applications*. Boston, Massachusetts, Artech House, 2008. 305 p.

7. Anikin A.V. Opredelenie mestopolozheniya mobil'nogo ob'ekta s pomoshch'yu priemopredatchikov nanoLOC firmy Nanotron [Locating mobile object using transceivers of nanoLOC company Nanotron]. *Besprovodnye tekhnologii – Wireless Technologies*, 2007, no. 3, pp. 38–41.

8. Rong P., Sichitiu M.L. Angle of arrival localization for wireless sensor networks. *3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks: Secon'06*, Reston, Virginia, USA, 25–28 September 2006, vol. 1, pp. 374–382. doi: 10.1109/SAHCN.2006.288442

9. Redzic M., Ó'Conaire C., Brennan C., O'Connor N.E. A hybrid method for indoor user. *Adjunct Proceedings of the 4th European Conference on Smart Sensing and Context: EuroSSC 2009*, Guildford, United Kingdom, 16–18 September 2009, pp. 25–28.

10. Maslov V.A. *Modeli i algoritmy identifikatsii i pozitsionirovaniya mobil'nykh sredstv svyazi v sistemakh podderzhki prinyatiya reshenii*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Models and algorithms for the identification and positioning of mobile communications in the decision support systems. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Penza, 2011. 20 p.

11. Poniakar A.V., Evseev O.V., Anciperov B.E., Mansurov G.K. [Study the possibility of local positioning in wireless networks IEEE 802.15.4]. *Materialy IV Vserossiiskoi konferentsii "Radiolokatsiya i radiosvyaz"* [Materials of IV All-Russian Conference "Radar and radio"], Moscow, 29 November – 3 December 2010, pp. 914–918.

12. Kvyatkovskaya I.Yu., Pham Q.H. Sistema pokazatelei otsenki kachestva telekommunikatsionnykh uslug i metod ikh otsenki [System of criteria of evaluation of quality of telecommunication services and method of their evaluation]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: Management, computer science and informatics*, 2013, no. 2, pp. 98–103.

13. Losev N.N., Dmitriev V.N. Analiz proizvoditel'nosti protokolov urovnya dostupa k srede v besprovodnykh lokal'nykh setyakh [Productivity analysis of protocols of the access level to the medium in wireless local area networks]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: Management, computer science and informatics*, 2011, no. 2, pp. 126–131.

14. Miniakhmetov R.M., Rogov A.A., Tsymler M.L. Obzor algoritmov lokal'nogo pozitsionirovaniya dlya mobil'nykh ustroystv [Browse local positioning algorithms for mobile devices]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika – Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Informatics*, 2013, no. 2, pp. 83–96.

15. Kuchin I.Yu. Zashchita konfidentsial'nosti personal'nykh dannykh s pomoshch'yu obezlichivaniya [Protecting the confidentiality of personal data by means of depersonalization]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: Management, computer science and informatics*, 2010, no. 2, pp. 158–162.

16. Kudrin V.A., Sharapov A.P. Metody pozitsionirovaniya abonentov vntri pomeshchenii, osnovannyye na radio-otpechatkakh (location fingerprinting methods) [Methods of ranking indoor

subscribers based on radio fingerprints (location fingerprinting methods)]. *Vychislitel'nye seti. Teoriya i praktika – Network-journal. Theory and Practic (BC/NW)*, 2012, no. 2 (21), pp. 1–8.

17. Roos T., Myllymaki P., Tirri H., Misikangas P., Sievanen J. A probabilistic approach to WLAN user location estimation. *International Journal of Wireless Information Networks*, 2002, no. 9, pp. 155–163.

18. Kudrin V.A. Sharapov A.P. [Determining the location of the called party in the DECT radio access system using the methods of statistical analysis]. *Trudy XVI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii “Informatsionnye sredstva i tekhnologii” – Proceedings of the International Scientific Conference “Information resources and technologies”*, Moscow, 21–23 October 2008, vol. 1, pp. 58–61. (In Russian).

19. Mikolajczyk K., Tuytelaars T., Schmid C., Zisserman A., Matas J., Schaffalitzky F., Kadir T., Gool L. A comparison of affine region detectors. *International Journal of Computer Vision*, 2005, no. 65 (1), pp. 43–72. doi: 10.1007/s11263-005-3848-x

УДК 628-1/-9

Современные разработки аварийно-спасательных роботов: возможности и принципы их применения*

А.И. МОТИЕНКО¹, А.Л. РОНЖИН², Н.А. ПАВЛЮК³

¹ 199178, РФ, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, научный сотрудник. E-mail: anna.gunchenko@gmail.com

² 199178, РФ, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, доктор технических наук. E-mail: ronzhin@ias.spb.su

³ 199178, РФ, г. Санкт-Петербург, 14 линия В.О., 39, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, младший научный сотрудник. E-mail: pavlyk.nikita@gmail.com

В работе дается краткий обзор нормативных актов, регламентирующих аварийно-спасательные работы в зонах чрезвычайных ситуаций. Анализируются правила и способы транспортировки пострадавших на предмет возможности применения для этой цели различных типов роботов. Стоит понимать, что основную роль при выборе способа, средств, положений, в которых будут транспортироваться пострадавшие, играют виды травм, их локализация и состояние пострадавших. В ходе подготовки статьи были проанализированы научные работы нескольких последних лет, на основе которых подготовлен обзор современного состояния в области создания аварийно-спасательных роботов. В данном обзоре основное внимание уделяется разработкам гуманоидных и социальных (групповых) роботов, которые предназначены для обнаружения и спасения людей в зоне чрезвычайных ситуаций, а также для работы в условиях, опасных для здоровья человека. Анализируется возможность применения существующих образцов роботов для разных типов работ по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, оказанию первой помощи пострадавшим и их транспортировке. В работе также описаны основные направления, на которых концентрируются ведущие разработчики, а именно создание дистанционно управляемых роботов, ориентированных на работу на различных стадиях ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Кроме того, в обзоре представлена попытка создать роботов, дистанционно управляемых группой людей-операторов и способных осуществлять как силовые воздействия на различные встречающиеся в районе катастрофы объекты, так и тонко координированные действия, связанные с различными видами анализа образцов на месте катастрофы и с оказанием первой помощи людям, пострадавшим во время чрезвычайной ситуации.

* Статья получена 16 июня 2015 г.

Ключевые слова: робототехника, аварийно-спасательные роботы, человеко-машинное взаимодействие, манипуляторы, транспортировка пострадавших, первая помощь, аварийно-спасательные роботы, чрезвычайная ситуация

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-147-165

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей статьи является анализ современного состояния робототехники, предназначенной для аварийно-спасательных работ, а также анализ возможности и методов применения этой робототехники в чрезвычайных ситуациях. Чрезвычайные ситуации (ЧС) техногенного и природного характера продолжают приносить множество бед, уносят человеческие жизни.

Ликвидация чрезвычайных ситуаций – это аварийно-спасательные и другие неотложные работы, проводимые при возникновении чрезвычайных ситуаций и направленные на спасение жизней и сохранение здоровья людей, снижение ущерба природной среде и материальных потерь, а также на локализацию зон чрезвычайных ситуаций, прекращение действия характерных для них опасных факторов.

Проведение аварийно-спасательных и других неотложных работ является одной из основных задач Российской единой системы предотвращения чрезвычайных ситуаций (РСЧС) и Гражданской обороны (ГО).

Аварийно-спасательные и другие неотложные работы (АСДНР) – совокупность первоочередных работ в зоне чрезвычайной ситуации, заключающихся в спасении и оказании помощи людям, в локализации и подавлении очагов поражающих воздействий, в предотвращении возникновения вторичных поражающих факторов, в защите и спасении материальных и культурных ценностей [1]. В работе [2] приводится классификация следующих видов АСДНР: поисково-спасательные; горноспасательные; газоспасательные; противодонные работы (на буровых и нефтяных скважинах); аварийно-спасательные работы, связанные с тушением пожаров; работы по ликвидации медико-санитарных последствий чрезвычайных ситуаций; другие работы, перечень которых может быть дополнен решением Правительства Российской Федерации.

Целью любых аварийно-спасательных и других неотложных работ является спасение людей и оказание помощи пострадавшим, локализация аварий и устранение повреждений, препятствующих проведению спасательных работ, а также создание условий для последующего проведения восстановительных работ [2].

Согласно п. 4 ст. 1 Федерального закона «Об аварийно-спасательных службах и статусе спасателей» от 22 августа 1995 г. № 151-ФЗ [3], аварийно-спасательные работы – это действия по спасению людей, материальных и культурных ценностей, по защите природной среды в зонах чрезвычайных ситуаций, по локализации чрезвычайных ситуаций и подавлению или доведению до минимально возможного уровня воздействия характерных для них опасных факторов. Аварийно-спасательные работы характеризуются наличием факторов, угрожающих жизни и здоровью проводящих эти работы людей, и требуют специальной подготовки, экипировки и оснащения. На основе перечисленных выше факторов разработана классификация видов аварийно-спасательных работ (табл. 1).

Таблица 1

Классификация видов аварийно-спасательных работ

Аварийно-спасательные работы	Другие неотложные работы, в том числе в очагах поражения, образовавшихся в результате военных действий
<ul style="list-style-type: none"> • Разведка маршрутов движения формирований и участков предстоящих работ • Локализация и тушение пожаров на путях движения формирований и участках работ • Розыск пострадавших и извлечение их из завалов, поврежденных и горящих зданий, загазованных, задымленных и затопленных помещений • Подача воздуха в заваленные защитные сооружения с поврежденной вентиляцией • Вскрытие разрушенных, поврежденных и заваленных защитных сооружений, спасение находящихся там людей • Оказание первой медицинской помощи пострадавшим и эвакуация их в лечебные учреждения • Вывоз (вывод) населения из опасных мест в безопасные районы • Санитарная обработка людей, обеззараживание их одежды, территории, сооружений, техники, воды и продовольствия 	<ul style="list-style-type: none"> • Прокладка колонных путей и устройство проездов (проходов) в завалах и на зараженных участках • Локализация аварий на коммунально-энергетических и технологических сетях • Укрепление или обрушение угрожающих обвалом конструкций зданий (сооружений) на путях движения к участкам проведения работ • При ведении аварийно-спасательных и других неотложных работ в очагах поражения, образовавшихся в результате военных действий, дополнительно проводится: <ul style="list-style-type: none"> – обнаружение, обезвреживание и уничтожение невзорвавшихся боеприпасов в обычном снаряжении; – ремонт и восстановление поврежденных защитных сооружений; – обеззараживание очагов поражения; – сбор материальных ценностей; – обеспечение питанием нуждающегося в нем населения; – утилизация зараженного продовольствия и другие работы, направленные на предотвращение возникновения эпидемии

Большое количество возникающих чрезвычайных ситуаций требует участия в спасательных операциях сил специального назначения МЧС России. Их основу составляют Войска гражданской обороны (ГО) министерства. По Женевской конвенции войска гражданской обороны не принимают участия в военных конфликтах. Их предназначение – оказание помощи мирному населению вне зависимости от национальности и политических взглядов.

При выполнении аварийно-спасательных работ часто возникают ситуации, опасные для жизни человека. Свести к минимуму степень риска для спасателей позволяет использование так называемых безлюдных технологий.

Среди множества современных робототехнических средств особое место занимают мобильные подвижные роботы. Широкий спектр их функциональных возможностей, постоянная готовность к внезапному применению делают мобильных роботов незаменимыми для служб экстренного реагирования.

В ноябре 2014 года на заседании Коллегии МЧС России [4] были рассмотрены вопросы переоснащения подразделений МЧС России современными

ми техническими средствами и техникой до 2017 года, а также использования в пожарно-спасательных подразделениях робототехнических комплексов, беспилотных летательных аппаратов и дальнейшего развития робототехники и технологий ее применения.

На данный момент в подразделениях МЧС России на вооружении находятся наземные, подводные и воздушные робототехнические комплексы различной номенклатуры и целевого предназначения [5]. Так, в Ногинском спасательном центре для разминирования используется высокотехнологический робототехнический комплекс MV-4 (многофункциональный механический комплекс по разминированию противопехотных мин) [6]. В отрядах «Госакваспас» и «Центроспас» проводятся работы с использованием подводных робототехнических комплексов.

Также в подразделениях МЧС России применяются беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с входящими в них летательными аппаратами самолетного, вертолетного и мультикоптерного типа [6].

Рынок робототехники в России существует и развивается уже более 10 лет. Современные разработки применяются в разных областях: от социально-бытовой до военно-технической как в штатных ситуациях, так и в экстремальных. Робототехническое оборудование используется при проведении аварийно-спасательных работ, в медицине, в ходе боевых действий и антитеррористических операций, в разведке, охране, при разминировании и обеспечивает высокую эффективность проводимых работ и максимальную безопасность здоровью и жизни человека.

В некоторых ситуациях человек может оказаться бессилён, если возникает большая угроза не только гибели пострадавших, но и провала всей операции. Решением таких проблем может стать создание робота, предназначенного для транспортировки пострадавших при ЧС, а также раненых на поле боя. Но для этого необходимо знать правила и способы транспортировки пострадавших. Данному вопросу посвящен следующий раздел.

1. АНАЛИЗ ПРАВИЛ И СПОСОБОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПОСТРАДАВШИХ

Основными мероприятиями при транспортировке пострадавших являются следующие:

- определение способа транспортировки;
- подготовка пострадавших;
- подготовка специальных и подручных транспортных средств;
- выбор маршрута;
- погрузка пострадавших в транспортные средства;
- обеспечение безопасности пострадавших и спасателей при транспортировке;
- преодоление препятствий, контроль над состоянием пострадавших, организация отдыха.

Ведущую роль при выборе способа, средств, положений, в которых будут транспортироваться пострадавшие, играют виды травм, их локализация, состояние людей, характер заболевания.

Не менее важным элементом транспортировки является выбор оптимальной позы пострадавших. Она должна определяться с учетом травмы и состояния пострадавшего (табл. 2) [7].

Таблица 2

Оптимальные виды транспортировки пострадавших в зависимости от травмы

Вид травмы	Положение
Сотрясение головного мозга	На спине
Травмы передней части головы и лица	На спине
Повреждение позвоночника	На спине
Переломы костей таза и нижних конечностей	На спине
Шоковое состояние	На спине
Травмы органов брюшной полости	На спине
Травмы груди	На спине
Травмы нижних конечностей	На спине, с валиком под травмированной ногой
Острые хирургические заболевания (аппендицит, прободная язва, ущемленная грыжа)	На спине
Кровопотеря	На животе с валиком под грудью и головой
Травмы спины	На животе или правом боку
Травмы затылочной части головы	На животе
Травмы шеи	Положение полусидя с опущенной вперед головой
Ампутированная верхняя конечность	Сидя с поднятой вверх рукой
Травмы глаза, груди, дыхательных путей	Сидя
Травмы верхних конечностей	Сидя
Ушибы, порезы, ссадины	Сидя
Травмы спины, ягодиц, задней поверхности ног	На животе
Травмы плечевого пояса	Сидя

Транспортировка должна осуществляться бережно, чтобы не усилить страдания пострадавшего, так как усиление боли не только ухудшает его общее состояние, но и может стать причиной развития посттравматического шока. Разрабатываемый робот-санитар должен учитывать все особенности, связанные с транспортировкой.

2. АНАЛИЗ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ПОСТРАДАВШИХ

Роботы способны быстро действовать в непредсказуемой и опасной среде. Их системы машинного зрения, связи и движения работают в самых напряженных условиях (задымленность, пыль и огонь в зоне бедствия). Сей-

час роботы-спасатели чаще всего применяются в чрезвычайных ситуациях геологического происхождения. Большое число передовых разработок посвящено именно созданию роботов, перспективных при ликвидации последствий землетрясений. В ходе нашего исследования были проанализированы научные работы последних пяти лет, основное внимание в которых уделено разработкам гуманоидных и социальных (групповых) роботов, предназначенных для обнаружения и спасения людей в зоне чрезвычайных ситуаций (ЧС), а также для работы в условиях, опасных для здоровья человека. Далее детально рассмотрено несколько моделей и прототипов телеуправляемых и автономных робототехнических комплексов.

Робот «Перевертыш». В 2012 году студентами НИ ИрГТУ [8] на базе конструкторского бюро «Импульс» в рамках Второго международного молодежного промышленного форума «Инженеры будущего-2012» была представлена модель робота «Перевертыш». Данный робот предназначен для поиска и транспортировки людей, пострадавших в природных и техногенных катастрофах, для тушения пожаров, перевозки различных грузов, выполнения строительно-монтажных работ и дистанционной диагностики параметров места ЧС. По утверждению авторов разработки, особенность данной модели заключается в том, что робот может перевернуться и выполнять свои функции в таком положении, а также перемещаться по различным типам ландшафта. Также, по утверждению разработчиков, модель робота может быть оснащена различным сменным оборудованием: грузовыми захватами, дисковыми пилами, средствами тушения очагов пожара и т. д.

Робот потенциально будет способен перемещаться со скоростью 12 км/ч в любом положении и выполнять разведку местности, его грузоподъемность составит 100 кг. При этом, по утверждению разработчиков, максимальный преодолеваемый уклон – 50...60°, тогда как у аналогов он составляет – до 30°.

Проект ICARUS. Проект ICARUS ориентирован на развитие беспилотных технологий поиска и спасения для обнаружения, локализации и спасения людей. Дистанционно управляемые аппараты поиска и спасения выступают в качестве первых разведчиков территории наряду с другими участниками для обеспечения безопасности человеческого персонала.

Основная цель проекта ICARUS – применение инновационных технологий для повышения эффективности управления ликвидацией последствий катастрофы и, таким образом, для уменьшения риска причинения вреда и последствий этого вреда для граждан [9].

Участвующая в проекте ICARUS бельгийская команда скорой помощи и поддержки (B-FAST) сформулировала свои требования о необходимости двух типов автоматизированных платформ в операциях по поиску и спасению:

– малое беспилотное наземное транспортное средство (БНТС), способное проникать в разрушенные здания для поиска пострадавших;

– большое беспилотное наземное транспортное средство, которое может быть использовано в качестве мобильной базы с широкими возможностями зондирования, передачи собранных данных операторам для повышения их ситуационной осведомленности. Важнейшим требованием является то, чтобы это транспортное средство могло передвигаться по пересеченной местности. Также большое БНТС служит базовой платформой для малого БНТС, а также

для беспилотных летательных аппаратов (БЛА), что позволит исследовать большие площади в короткие сроки.

Управление роботами для поиска и спасения может быть организовано как индивидуальное, так и совместное, при этом они должны выполнять высокоуровневые команды, получаемые от базовой станции, и ориентироваться в автономном и полуавтономном режиме.

Роботы должны быть связаны с базовой станцией и друг с другом с помощью беспроводной самоорганизующейся когнитивной сети узлов мобильной связи, которая адаптируется к местности. Они должны быть оснащены датчиками, которые обнаруживают присутствие человека, а также будут оснащены широким набором датчиков других типов. На базовой станции данные обрабатываются и сопоставляются с географической информацией, тем самым повышая ситуационную осведомленность персонала, ведущего работу на месте.

Использование таких (полу)автономных наземных транспортных средств для поисково-спасательных операций будет иметь ряд преимуществ: исследование и сбор данных без риска для жизни людей; раннее обнаружение опасности; динамическое планирование траектории движения. Перечисленные преимущества достигаются за счет комплексного применения в проекте ICARUS большого и маленького БНТС совместно с БПЛА, а также внедрения в робототехнические комплексы различных типов бесконтактных сенсоров. Кроме того, полуавтоматическая работа на основе удаленной поддержки опытного спасателя позволяет расширить область решаемых задач и эффективность таких комплексов.

Большое БНТС будет обладать возможностью преодолевать серьезные препятствия и большие расстояния за сравнительно короткое время. Планируется, что максимальная скорость составит 25 км/ч. Таким образом, малое транспортное средство может быть доставлено очень быстро и близко к потенциальному местонахождению жертв. Благодаря небольшому размеру и весу оно может быть использовано для изучения узких мест (например, проходов между обломками рухнувшего здания), не травмируя людей и не нанося дальнейшего ущерба зданию.

Мощный манипулятор, установленный на большом БНТС, может быть использован оператором для удаления больших препятствий, которые могут блокировать путь транспортному средству, а также для подъема предметов, если пострадавший погребен под ними. Манипулятор будет спроектирован в виде 6-осевой руки, которая сможет поднимать до 250 кг. Таким образом, удаленное присутствие (телеприсутствие) оператора не ограничивается получением информации от датчиков или манипулированием мелкими предметами, как в обычных подходах, а расширено до перемещения крупных объектов. Предполагается использование интуитивно понятного пользовательского интерфейса с применением экзоскелета со встроенной обратной связью, что позволит легко управлять манипулятором.

Малое БНТС состоит из робота Вэнгарда, названного в честь разработчика – Аллена Вэнгарда. Эта роботизированная система будет оснащена силовой установкой, позволяющей ему маневрировать в очень неструктурированных средах, таких как разрушенные здания.

Из-за ограничений по размеру и весу малое БНТС не может быть оснащено ни сложными датчиками, ни мощным бортовым компьютером. Поэтому его автономные возможности будут ограничены простейшими задачами. На малом БНТС будет установлена видеокамера, поэтому телеоператор сможет получить визуальную информацию о месте катастрофы.

Таким образом, проект ICARUS предлагает несколько новых решений в области беспилотных наземных транспортных средств для поисково-спасательных операций.

Робот-санитар BEAR (Battlefield Extraction-Assist Robot). Разработанный американской компанией Vecna Technologies Cambridge Research Laboratory, робот предназначен для выполнения аварийно-спасательных работ на поле боя, а также при ликвидации последствий землетрясений или других чрезвычайных ситуаций [10]. Машина собственными силами может эвакуировать человека. Первые модели были построены в 2004 году. Рост робота составляет 1,8 м. Максимальный переносимый вес составляет 270 кг. Сохранять равновесие и не ронять при этом свой груз роботу позволяет система гироскопов и двигателей, управляемых компьютером.

Первые версии BEAR дистанционно управлялись оператором, который мог видеть и слышать все, что происходит в пространстве вокруг робота, на основе встроенных видеокамер и микрофонов. Разработки в области искусственного интеллекта BEAR дали роботу возможность обрабатывать много-модальные команды, данные оператором, такие как «Иди туда» или «Подбери ту коробку». Если по каким-то причинам робот не в состоянии выполнить команду оператора, то он запрограммирован так, чтобы попросить оператора о помощи для выполнения задачи.

Робот может также дистанционно управляться солдатом через устройство, известное как перчатка iGlove, разработанное компанией AnthroTronix и позволяющее солдату с помощью простых жестов рукой командовать BEAR. Такой аппарат дистанционного управления роботом может крепиться к карабину М-4 так, чтобы солдаты могли продолжать управлять BEAR, не выпуская свое оружие.

Робот BEAR оснащен гидравлическим приводом, который дает ему возможность поднять до 270 кг. Гидравлический привод управляется клапанами, контролирующими давление в гидравлических цилиндрах, и выключается, когда роботу нужно двигаться на гусеничном ходу. Гусеничные движители BEAR имеют электрический привод. Аккумуляторная батарея снабжает их энергией на срок до одного часа. Дальнейшее усовершенствование аккумуляторного блока должно удвоить емкость батареи и дать возможность BEAR вдвое увеличить возможное время езды на гусеничном ходу.

Текущая версия робота оснащена ИК-портом, приборами ночного видения и оптическими камерами, а также микрофоном. В дальнейшем планируется включение датчиков давления и тактильных сенсоров (Touch sensors) в руки робота, а также химических и биологических сенсоров обнаружения человека.

Руки робота очень сильны, однако они также могут совершать достаточно точные движения, чтобы взять куриное яйцо, не раздавив и не разбив его. Технология динамического балансирования дает ему возможность сохранять равновесие в любом положении, даже неся тяжелые объекты.

Последняя представленная версия 7.2 была во многом улучшена по сравнению с первоначальной. Новый робот обладает взрывозащищенными и огнестойкими протекторами и батареями. Во многом улучшена маневренность – обновлена гусеничная база с системой динамического баланса для повышения мобильности, а также усилена прочность BEAR – стальная рама в 4 раза прочнее, чем ее алюминиевая предшественница. Робот в состоянии поднять до 270 кг, тогда как предыдущие версии были способны поднять вес в 180 кг. Кроме того, гидравлические трубопроводы и элементы электропитания усилены и защищены от внешнего воздействия стальным каркасом.

Робот BEAR был протестирован военными США. В 2010 году солдаты работали с ним для разработки тактики его использования, а также проверили его эффективность в боевых условиях. В ходе дальнейших усовершенствований будет произведена замена стальной рамы робота BEAR на титановую. Характерными изменениями в модели следующего поколения BEAR (версия 8) станет существенное уменьшение веса, а также увеличение количества сенсоров различных типов и расширение диапазона выполняемых им задач. Разработчики Vecna работают над улучшением способности BEAR обрабатывать высокоуровневые команды, над улучшением его навигационной системы и его взаимодействия с окружающей средой [10].

Рассмотрим области применения и типы задач, решаемых этим роботом. Одной из задач робота BEAR является вынос раненого человека из опасной окружающей среды в место, где медик без риска для жизни может оценить тяжесть полученных повреждений тела. Размеры, оснащение и характеристики робота, в том числе небольшая ширина, позволяют выполнять задачи как вне, так и внутри помещений, например, проходить через двери и подниматься по лестнице.

Другое применение BEAR: поиск и спасение, транспортировка поставок, устранение препятствий, подъем тяжелых предметов, обработка опасных материалов, разведка, обследование мин и самодельных взрывных устройств. В мирное время робот BEAR предназначен для спасения людей в шахте; в районах, загрязненных биологическими, ядерными или химическими отходами; в небезопасном здании после землетрясения, пожара, оползней или взрыва.

У робота может быть промышленное и коммерческое применение, такое как подъем и безопасное перемещение тяжелого инвентаря. В здравоохранении BEAR может безопасно переносить тяжелых пациентов в больницах, помогать людям с ограниченными возможностями и пожилым людям.

Робот-спасатель SHIMP. Центр робототехники при Университете Карнеги – Меллона, штат Пенсильвания, разрабатывает робота-спасателя SHIMP (CMU Highly Intelligent Mobile Platform) с повышенной устойчивостью для выполнения сложных задач в опасных для человека условиях окружающей среды [11].

SHIMP выполнен в гуманоидном форм-факторе. Его высота составляет 1,6 м, масса – 181 кг. Робот оснащен руками с отставленными «большими пальцами». Всего на руках у SHIMP по три пальца, при помощи которых он может вращать руль автомобиля и использовать инструмент. Руки и ноги робота также оснащены гусеницами с резиновым покрытием, с помощью которых он и передвигается, как правило, с использованием для стабильности всех четырех конечностей. При необходимости SHIMP в состоянии двигать-

ся лишь на двух конечностях. Также отмечено, что вместо того, чтобы создавать машину, которой нужно было бы тщательно сбалансировать себя, перед тем как перешагнуть мусор (обломки), необходим робот, который способен опуститься на гусеницы и переехать этот мусор. Строение, сила и ловкость робота позволяют ему эффективно работать в таких сложных условиях. Путем поддержания статической, а не динамической устойчивости робота устраняется необходимость комплексного контроля его положения.

СНМР генерирует полную трехмерную модель окружающего пространства, используя различные датчики, встроенные в его голову, и передает эту модель человеку-оператору для получения без задержек ситуационной осведомленности последнего.

Он способен преодолевать сложные препятствия, карабкаться по вертикальным стенам, а также по приставной и пожарной лестнице, цепляясь за перекладины крюками. Развиваемый манипуляторами крутящий момент достаточно велик, чтобы робот смог самостоятельно закрыть вентиль, не поддающийся усилиям одного человека.

СНМР запрограммирован таким образом, что может без особых проблем перемещаться самостоятельно, сохраняя равновесие и избегая столкновений с другими объектами. В случае особой необходимости управление роботом может перехватывать оператор.

Робот HUBO. Человекоподобный робот с открытой платформой, HUBO, разрабатывается совместными усилиями нескольких групп [12]. Помимо KAIST, в его создании принимают участие многочисленные коллективы исследователей из США. Свой вклад внесли частный Университет Дрекселя, общественный Университет Пердью, Технологический институт Джорджии, университеты штатов Делавэр, Огайо, Индиана и Колумбийский университет. Создаваемая для конкурса, проводимого Агентством передовых оборонных исследовательских проектов США (Defense Advanced Research Projects Agency – DARPA), модель получила приставку с названием DRC (DARPA Robotics Challenge).

В представленном разработчиками деморолике робот способен пользоваться различной техникой, подручными инструментами, оценивать обстановку и расчищать себе путь. Для повышения устойчивости робот может временно отказаться от прямоходящего режима и перейти на ходьбу на четвереньках. Для этого тыльная сторона дистальной части манипулятора сделана широкой и пружинящей. Робот также должен быть способен подниматься по лестнице [12].

Аппаратная платформа DRC-HUBO базируется на переработанной модели HUBO2+ – человекоподобного робота, разработанного фирмой KAIST и Rainbow, Inc. Разработанная система позволяет трем операторам сообща управлять 32 степенями свободы робота в различных сложных мобильных манипуляционных задачах, используя один унифицированный подход [13]. Конструкция рук робота была сделана более подвижной, что требуется для управления транспортным средством с помощью этого робота.

Важным моментом является способ дистанционного управления роботом. Робот HUBO точно копирует любые движения, выполняемые оператором на другом аналогичном роботе.

Робот Atlas. Atlas – робот-гуманоид, разрабатываемый компанией Boston Dynamics при финансировании агентства DARPA. Робот высотой 1,8 м предназначен для выполнения разнообразных поисковых и аварийно-спасательных работ и был представлен общественности 11 июля 2013 года.

Разработка робота Atlas ведется с целью обеспечения помощи аварийно-спасательным службам в поисково-спасательных операциях, а также для выполнения таких задач, как отключение систем блокирования клапанов безопасности, открывание дверей и эксплуатация оборудования, работающего в условиях, опасных для здоровья человека [14].

Робот базируется на ранее разработанной компанией модели человекоподобного робота PETMAN и имеет туловище, голову и четыре конечности с гидравлическими приводами. Вес робота Atlas составляет 150 кг. Вся совокупность его движений производится с помощью 28 приводов. Робот имеет подсветку голубыми светодиодами. Atlas оснащен двумя системами технического зрения – лазерным панорамным локатором (лидаром) и стереовидеокамерами, которые контролируются бортовым компьютером [15].

Atlas способен перемещаться по пересеченной местности и подниматься самостоятельно, используя свои руки и ноги, хотя прототип 2013 года был подключен к внешнему источнику питания, чтобы поддерживать стабильность. В условиях лабораторных испытаний к роботу подходит несколько кабелей и шлангов. По кабелям подаются электроэнергия и команды от компьютера, а по шлангам доставляется жидкость для работы гидравлики. В октябре 2013 года Boston Dynamics представили видео, на котором Atlas смог выдержать возмущающее воздействие внешнего объекта (удар массивного отклоненного маятника – гири на подвесе), балансируя на одной ноге, и остаться в вертикальном положении.

В январе 2015 года была представлена обновленная модель робота [16]. Модернизированный Atlas был обновлен практически полностью (на 75 %) – от оригинального дизайна остались только голени и ступни. Использовались более легкие материалы, чтобы встроить тяжелую аккумуляторную батарею и новую насосную систему, при этом лишь незначительно увеличив массу робота.

Высота обновленного Atlas составляет 1,88 м (6'2"), а вес 156,5 кг (245 фунтов). Наибольшие изменения претерпели источник питания и насос (теперь робот сможет передвигаться, не полагаясь на трос с проводами), робот оснащен литий-ионным аккумулятором 3,7 кВт с возможностью работы в течение одного часа при выполнении задач смешанного типа, включающих ходьбу, стояние, использование различных инструментов и другие. Эти нововведения позволяют управлять насосом переменного давления, который позволяет увеличить коэффициент полезного действия искусственных гидравлических мышц робота. Другие основные обновления направлены на повышение эффективности, ловкости, устойчивости [17, 18]:

- регулируемое положение плеч и рук позволяет увеличить рабочее пространство перед роботом и дает ему возможность видеть свои руки в движении, обеспечивая тем самым дополнительную обратную связь от оптического датчика к оператору;

- новые предплечья оснащены электрическим приводом, что увеличит силу, ловкость и диапазон изменения прилагаемой силы;

- добавление дополнительной степени свободы в запястье означает, что робот будет в состоянии повернуть ручку двери, вращая ее запястьем;
- три встроенных бортовых компьютера используются для постановки и планирования задач, также встроенный в голову беспроводной маршрутизатор дает доступ к различным коммуникациям;
- модернизированные приводы в бедрах, коленях и спине дают роботу большую силу [19];
- предусмотрена возможность удаленного отключения робота в целях безопасности;
- благодаря новому насосу Atlas стал производить намного меньше шума, чем раньше.

На что способен новый прототип, выяснится в ходе конкурса DARPA Robotics Challenge (DRC), который пройдет в июне 2015 года. Робот будет поставляться с «эмулятором батареи» – временно установленным тренировочным инструментом, который имитирует работу реального аккумулятора. Это позволит переключать режимы между постоянным напряжением при обычной практике и дозированно изменяемым, чтобы смоделировать фактический срок службы батареи. Во время испытания будут имитироваться помехи беспроводной связи – это придаст обстановке, в которой действует робот, больше сходства с реальностью и поможет проверить способность таких машин действовать хотя бы отчасти автономно.

Роботы-спасатели и «роевой подход». Применение роевых принципов в робототехнике представляет собой новый подход к координации множества простых в своем устройстве роботов. Предполагается, что желаемое коллективное поведение возникает из взаимодействия роботов между собой и их взаимодействия с окружающей средой.

Относительно простые правила индивидуального поведения могут создавать сложное организованное поведение всего роя. Ключевым моментом является взаимодействие между членами группы, которое создает систему постоянной обратной связи. Поведение роя включает постоянную смену участников, взаимодействующих друг с другом, а также поведение всей группы в целом.

В отличие от просто распределенных робототехнических систем, роевая робототехника подразумевает *большое* количество роботов, взаимодействующих с использованием только локальной связи. Такая локальная связь может быть создана, например, на базе беспроводных систем передачи данных в радиочастотном или инфракрасном диапазонах.

В Массачусетском технологическом институте (MIT) ведутся разработки собственных технологий для роевых комплексов [20]. На данном этапе экспериментальных исследований была решена задача реконфигурации построения роботов. В начале эксперимента роботам необходимо было сбиться в беспорядочную толпу, а потом образовать четкое кольцо. Кроме того, роботы решали задачу перемещения на место подзарядки при низком уровне заряда их блоков питания [21, 22].

В качестве примеров применения роя роботов является спасение людей. Роботы, используемые для спасения при землетрясениях, могут быть трех вариантов: тысячи разведчиков размером с насекомое могут проникнуть под обломки и найти выживших, несколько десятков малых роботов могут подо-

браться к месту и решить проблему расчистки и выноса обломков, и несколько больших роботов-подъемников и роботов-носильщиков будут непосредственно осуществлять операцию спасения.

3. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ И МЕТОДОВ ПРИМЕНЕНИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ РОБОТОВ НА ПРИМЕРЕ НАИБОЛЕЕ ПРОДВИНУТЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧС

При возникновении ЧС в соответствии с нормативными документами создается временный штаб по ликвидации и составляется предварительный план мероприятий.

- Предварительная разведка маршрутов движения формирований и участков предстоящих работ и уточнение ситуации в районе ЧС, для чего сначала отправляются беспилотные летательные аппараты и производится предварительная классификация АСДНР согласно табл. 1 (здесь мы пока не будем рассматривать поисково-спасательные и горноспасательные работы).

- Дальнейшая наземная разведка и прокладка колонных путей и устройство проездов (проходов) в завалах и на зараженных участках, а также локализация и тушение пожаров на путях движения формирований и участках работ, для чего в район ЧС отправляются беспилотные гусеничные платформы типа роботов ICARUS, снабженные необходимыми манипуляторами и инструментом, которые производят анализ радиационного и химического загрязнения и задымления воздуха на местности, тушат очаги возгорания и расчищают путь для продвижения других видов аварийной техники.

- Локализация аварий на коммунально-энергетических и технологических сетях, для чего совместно с роботами типа ICARUS направляются роботы типа SHIMP, обладающие способностью пролезать через завалы и люки, карабкаться по пожарным лестницам, открывать замки и двери, закрывать предохранительные клапаны и заслонки, проводить ремонт и восстановление поврежденных защитных сооружений, а также обеззараживание очагов поражения.

- Розыск пострадавших и извлечение их из завалов, поврежденных и горящих зданий, загазованных, задымленных и затопленных помещений; санитарная обработка людей, обеззараживание их одежды, территории, сооружений, техники, воды и продовольствия, для чего направляются роботы типа ATLAS, HUBO и BEAR.

- Оказание первой медицинской помощи пострадавшим и эвакуация их в лечебные учреждения, для чего используются роботы типа HUBO и BEAR.

Последняя задача во многом сложнее предыдущих. Это обусловлено тем, что метод транспортировки пострадавшего зависит от его травмы и общего физического состояния (см. табл. 2). Робот не в состоянии оказать медицинскую помощь. Даже если человек в сознании, он не всегда адекватно может оценить свое состояние; если же человек без сознания, необходимо в любом случае определить, каким образом его можно транспортировать. Для этого робот должен быть оборудован необходимыми датчиками и видеокамерами для обратной связи с оператором. На месте оператора либо рядом с ним должен находиться квалифицированный медицинский работник, способный

по полученным данным оценить состояние пострадавшего и определить способ его транспортировки. Как вариант для решения этой задачи можно рассмотреть технологию, использованную при разработке робота DRC-HUBO, который способен точно копировать любые движения, выполняемые оператором на другом аналогичном роботе. Это позволило бы осмотреть пострадавшего более детально.

Согласно нашим сведениям, отечественных робототехнических средств, способных решать полный комплекс задач по ликвидации, сформулированный выше, не имеется. При этом отметим, что в настоящее время мероприятия по предварительной разведке маршрутов движения формирований можно выполнять на базе отечественной техники с помощью различного класса беспилотных летающих аппаратов отечественного производства [23–26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из проведенного обзора следует, что в области создания аварийно-спасательных роботов ведущие разработчики концентрируются в основном в следующих направлениях.

1) Создание дистанционно управляемых роботов, ориентированных на работу в первой стадии ликвидации последствий катастроф, т. е. на общую разведку-оценку обстановки на месте катастрофы, расчистку завалов, прокладку проходов и трасс для других роботов и людей-спасателей (проект ICARUS).

2) Создание дистанционно управляемых роботов, действующих на второй стадии ликвидации последствий ЧС. На этом этапе необходимы следующие классы специализированных роботов:

– роботы, ориентированные на проникновение в труднодоступные помещения через лазы и проходы, расчищенные предыдущим классом роботов;

– роботы, способные открывать двери, закрытые на замки, и передвигаться с помощью пожарных лестниц для проведения срочных аварийных работ (проект SHIMP);

– специализированные роботы для оказания первой помощи и транспортировки пострадавших в безопасное место (проект BEAR).

Также делается попытка создать роботов, дистанционно управляемых группой людей-операторов и способных осуществлять как силовые воздействия на различные встречающиеся в районе катастрофы объекты, так и тонко координированные действия, связанные с химическим, биологическим и радиационным анализом образцов на месте катастрофы и с оказанием первой помощи людям, пострадавшим от катастрофы (проект HUBO).

3) Создание роботов, ориентированных в перспективе на полностью автономные действия без участия человека-оператора (проект ATLAS). Оператор в этом случае может лишь выполнять консультативные функции по запросу самого робота.

4) Разработка ориентированных на выполнение определенных аварийно-спасательных задач роевых структур - групп специализированных роботов.

Из приведенного анализа также следует, что на второй стадии ликвидации последствий ЧС необходимо одновременное применение минимум двух различных типов дистанционно управляемых роботов.

В данной работе сделан обзор современного уровня аварийно-спасательной робототехники, обсуждаются возможности передовых образцов роботов ведущих западных и отечественных организаций. Также проведен анализ нормативных актов, регламентирующих аварийно-спасательные работы в зонах чрезвычайных ситуаций. Анализируются правила и способы транспортировки пострадавших на предмет возможности применения для этой цели различных типов роботов. Анализируется возможность применения существующих моделей роботов для разных типов работ по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, транспортировке и оказанию первой помощи пострадавшим. На примере наиболее продвинутых моделей роботов демонстрируются широкие возможности по ликвидации последствий ЧС и оказанию неотложной помощи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безопасность жизнедеятельности: безопасность в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера: учебное пособие / В.А. Акимов и др. – М.: Абрис, 2012. – 592 с.
2. Мажуховский Э.И. Аварийно-спасательные и другие неотложные работы // Технологии гражданской безопасности. – 2006. – Т. 3, № 2. – С. 88–92.
3. Федеральный закон от 22.08.1995 № 151-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Об аварийно-спасательных службах и статусе спасателей» [Электронный ресурс]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_148644/ (дата обращения: 09.10.2015).
4. Об утверждении плана реализации госпрограммы «Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, обеспечение пожарной безопасности и безопасности людей на водных объектах» на 2014 год и на плановый период 2015 и 2016 годов [Электронный ресурс]. – URL: <http://government.ru/docs/15616/> (дата обращения: 09.10.2015).
5. Заседание Коллегии МЧС России, 12 ноября 2014 г. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.mchs.gov.ru/dop/info/smi/news/item/2630187> (дата обращения: 09.10.2015).
6. Военная и специальная робототехника для России: обзор производителей роботов и их продукции [Электронный ресурс]. – URL: <http://sa100.ru/robots2/manufacture/Russia/Obzor/RusMan1.htm> (дата обращения: 22.02.2015).
7. Учебник спасателя / С.К. Шойгу, М.И. Фалеев, Г.Н. Кириллов, В.И. Сычев, В.О. Капканщиков, А.Ю. Виноградов, С.М. Кудинов, С.А. Ножевой, А.Ф. Неживой; под общ. ред. Ю.Л. Воробьева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Краснодар: Советская Кубань, 2002. – 528 с.
8. В НИ ИргТУ создали опытную модель робота «Перевертыш», способного искать людей в завалах при ЧС [Электронный ресурс]. – 2012. – URL: <http://www.istu.edu/news/13598/> (дата обращения: 22.02.2015).
9. Search and rescue robots developed by the European ICARUS project [Electronic resource] / G. De Cubber, D. Serrano, K. Berns, K. Chintamani, R. Sabino, S. Ourevitch, D. Doroftei, C. Armbrust, T. Flemma, Y. Baudoin // Proceedings of 7th International Workshop on Robotics for Risky Environments, St. Petersburg, 1–3 October 2013. – URL: <http://www.fp7-icarus.eu/sites/fp7-icarus.eu/files/publications/Search%20and%20Rescue%20robots%20developed%20by%20the%20European%20ICARUS%20project%20-%20Article.pdf> (accessed: 09.10.2015).
10. Mobile reconfigurable robot: patent US 8106616 B1 / inventors D. Theobald. – N US 12/721,810; appl. date 11.03.2010; publ. date 31.01.2012. – URL: <http://www.google.com/patents/US8106616> (accessed: 09.10.2015).
11. CHIMP, the CMU highly intelligent mobile platform / A. Stentz, H. Herman, A. Kelly, E. Meyhofer, G.C. Haynes, D. Stager, B. Zajac, J.A. Bagnell, J. Brindza, C. Dellin, M. George, J. Gonzalez-Mora, S. Hyde, M. Jones, M. Laverne, M. Likhachev, L. Lister, M. Powers, O. Ramos, D. Rice, J. Schefflee, R. Sidki, J.-S. Valois, J.M. Vande Weghe, M.D. Wagner, C. Wellington. // Journal of Field Robotics. – 2015. – Vol. 32, iss. 2. – P. 209–228.
12. Motion planning and control of ladder climbing on DRC-Hubo for DARPA Robotics Challenge / Y. Zhang, L. Jingru, K. Hauser, H.A. Park, M. Paldhe, C.S.G. Lee, R. Ellenberg, B. Killen, P. Oh, J.H. Oh, L. Jungho, K. Inhyeok // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014), Hong Kong, China, May 31 – June 7, 2014. – Hong Kong: IEEE, 2014. – P. 2086.

13. A General-purpose System for Teleoperation of the DRC-HUBO Humanoid Robot / M. Zucker, S. Joo, M.X. Grey, C. Rasmussen, E. Huang, M. Stilman, A. Bobick, K. Iagnemma, J. Overholt // *Journal of Field Robotics*. – 2015. – Vol. 32, iss. 3. – P. 336–351.
14. Kolawole E. What if this ATLAS shrugged? – DARPA unveils new humanoid robot [Electronic resource] // *Washington Post*. – 2013. – July 12. – URL: <http://www.washingtonpost.com/blogs/innovations/wp/2013/07/12/what-if-this-atlas-shrugged-darpa-unveils-new-humanoid-robot/> (accessed: 09.10.2015).
15. Hornyak T. Be afraid: DARPA unveils terminator-like atlas robot [Electronic resource] // CNET. – 2013. – July 11. – URL: <http://www.cnet.com/news/be-afraid-darpa-unveils-terminator-like-atlas-robot/> (accessed: 09.10.2015).
16. Upgraded atlas robot to go wireless as the stakes are raised for the DARPA robotics challenge finals [Electronic resource] // DARPA: defense advanced research projects agency. – 2015. – January 20. – URL: <http://www.darpa.mil/news-events/2015-01-20> (accessed: 09.10.2015).
17. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot [Electronic resource] / S. Kuindersma, R. Deits, M. Fallon, A. Valenzuela, H. Dai, F. Permenter, T. Koolen, P. Marion, R. Tedrake // *Autonomous Robots*. – 2015. – 31 July. – URL: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10514-015-9479-3>. – doi: 10.1007/s10514-015-9479-3 (accessed: 09.10.2015).
18. An architecture for online affordance-based perception and whole-body planning / M. Fallon, S. Kuindersma, S. Karumanchi, M. Antone, T. Schneider, H. Dai, S. Perez-D'Arpino, R. Deits, M. DiCicco, D. Fourie, T. Koolen, P. Marion, M. Posa, A. Valenzuela, Y.P. Kuan-Ting, Shah J.A., Iagnemma K., Tedrake R., Teller S. // *Journal of Field Robotics*. – 2015. – Vol. 32, iss. 2. – P. 229–254.
19. Kuindersma S., Permenter F., Tedrake R. An efficiently solvable quadratic program for stabilizing dynamic locomotion // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014)*, Hong Kong, China, 31 May – 7 June 2014. – Hong Kong: IEEE, 2014. – P. 2589–2594. – doi: 10.1109/ICRA.2014.6907230.
20. Becker A., Ertel C., McLurkin J. Crowdsourcing swarm manipulation experiments: a massive online user study with large swarms of simple robots // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014)*, Hong Kong, China, May 31 – June 7, 2014. – Hong Kong: IEEE, 2014. – P. 2825–2830. – doi: 10.1109/ICRA.2014.6907264.
21. Bachrach J., Beal J., McLurkin J. Composable continuous-space programs for robotic swarms // *Neural Computing & Applications*. – 2010. – Vol. 19, iss. 6. – P. 825–847. – doi: 10.1007/s00521-010-0382-8.
22. Lee S.K., McLurkin J. Distributed cohesive configuration control for swarm robots with boundary information and network sensing // *Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, Chicago, Illinois, USA, 14–18 September, 2014. – Chicago: IEEE, 2014. – P. 1161–1167.
23. Беспилотный самолет ZALA 421-08M [Электронный ресурс]. – URL: <http://zala.aero/zala-421-08/> (дата обращения: 09.10.2015).
24. Разработка сетевцентрической интеллектуальной системы адаптивного планирования действий группы автономных беспилотных аппаратов для согласованного выполнения поставленных задач / Д.С. Будаев, Г.Ю. Вошук, А.Н. Мочалкин, В.С. Травин // *Материалы 10 Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» (Таганрог–Домбай, 2015)*. – Ростов н/Д.: ЮФУ, 2015. – Т. 1. – С. 166–172.
25. БЛА Т23Э: беспилотный летательный аппарат [Электронный ресурс]. – URL: http://www.enics.ru/detail?product_id=20 (дата обращения: 10.10.2015).
26. Проектирование манипуляторов для работы в экстремальных условиях / В.Н. Шашок, С.И. Филиппов, Д.В. Багаев, А.Н. Малышев, А.А. Кобзев, В.Н. Умнов // *Материалы 10 Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» (Таганрог–Домбай, 2015)*. – Ростов н/Д.: ЮФУ, 2015. – Т. 1. – С. 267–278.

Мотиенко Анна Игоревна, научный сотрудник группы информационных технологий в образовании Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. E-mail: anna.gunchenko@gmail.com

Ронжин Андрей Леонидович, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией автономных робототехнических систем Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. Имеет более 200 публикаций. E-mail: ronzhin@iias.spb.su

Павлюк Никита Андреевич, младший научный сотрудник группы информационных технологий в образовании Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. E-mail: pavlyk.nikita@gmail.com

Modern developments of rescue robots: possibilities and principles of their application*

A.I. MOTIENKO¹, A.L. RONZHIN², N.A. PAVLYUK³

¹ St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia. E-mail: anna.gunchenko@gmail.com

² St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia, Ph.D., Dr. Sci. E-mail: ronzhin@iias.spb.su

³ St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia. E-mail: pavlyk.nikita@gmail.com

The paper gives a brief overview of the normative acts governing rescue work in emergency zones. Rules and ways of transportation of the victims regarding a possibility of applying various types of robots to do this are analyzed. Types of injuries, their location and the condition of victims are important in choosing ways, means and positions of transportation of victims. This review focuses on the development of humanoid and social (group) robots which are designed to locate and rescue people in the area of emergency situations as well as to work in conditions that are hazardous to human health. A possibility of using the existing models of robots for different types of work to eliminate the consequences of emergency situations, to render first-aid treatment to the victim and to transport them is analyzed. The paper also describes the main areas on which leading designers were concentrated, namely, the development of remote-controlled robots designed to work at various stages of disaster management. An attempt to create robots remote-controlled by a group of operators that can carry both a force action on various objects occurring in the area of disaster and accurately coordinated actions related to different types of sample analysis at the crash site and giving first aid to people affected by the emergency is presented in the review.

Keywords: robotics, search-and-rescue, human-machine interaction, manipulators, transportation of the injured, first aid, rescue work, emergency

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-147-165

REFERENCES

1. Akimov V.A., Vorob'ev Ju.L., Faleev M.I. et al. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti: bezopasnost' v chrezvychainykh situatsiyakh prirodnogo i tekhnogenogo kharaktera* [Health-and-safety. Safety in emergency situations of natural and technogenic character]. Moscow, Abris Publ., 2012. 592 p.
2. Mazhukhovskii E.I. *Avariino-spasatel'nye i drugie neotlozhnye raboty* [Rescue and other emergency work]. *Tekhnologii grazhdanskoi bezopasnosti – Technologies of Civil Safety*, 2006, vol. 3, no. 2, pp. 88–92.
3. RF Federal law "On rescue services and status of rescuers" of August 22, 1995 N 151-FZ. (In Russian). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_148644/ (accessed 09.10.2015)

* Received 16 June 2015.

4. On approval of the state program "The protection of the population and territories from emergency situations, fire safety and security on water bodies" in 2014 and the planned period 2015 and 2016). (In Russian). Available at: <http://government.ru/docs/15616/> (accessed 09.10.2015)
5. The meeting of the Board of Ministry of emergency situations, 12 November 2014. (In Russian). Available at: <http://www.mchs.gov.ru/dop/info/smi/news/item/2630187> (accessed 09.10.2015).
6. *Voennaya i spetsial'naya robototekhnika dlya Rossii. Obzor proizvoditelei robotov i ikh produktsii* [A military and express robotics for Russia. Review of robot manufacturers and their products]. Available at: <http://sa100.ru/robots2/manufacture/Russia/Obzor/RusMan1.htm> (accessed 09.10.2015)
7. Shoigu S.K., Faleev M.I., Kirillov G.N., Sychev V.I., Kapkanshchikov V.O., Vinogradov A.Yu., Kudinov S.M., Nozhevoi S.A., Nezhivoi A.F. *Uchebnik spasatelya* [The textbook of the rescuers]. 2nd ed., rev. and enl. Krasnodar, Sovetskaya Kuban' Publ., 2002. 528 p.
8. *V NI IrGTU sozdali opytную model' robota «Perevertysch», sposobnogo iskat' lyudei v zavalakh pri ChS* [In Irkutsk national research technical university created a pilot model of the "Perevertysch" robot capable to look for people in blockages at an emergency]. Available at: <http://www.istu.edu/news/13598/> (accessed 09.10.2015)
9. De Cubber G., Serrano D., Berns K., Chintamani K., Sabino R., Ourevitch S., Doroftei D., Armbrust C., Flamma T., Baudoin Y. Search and rescue robots developed by the european ICARUS project. *Proceedings of 7th International Workshop on Robotics for Risky Environments*, St. Petersburg, 1–3 October 2013. Available at: <http://www.fp7-icarus.eu/sites/fp7-icarus.eu/files/publications/Search%20and%20Rescue%20robots%20developed%20by%20the%20European%20ICARUS%20project%20-%20Article.pdf> (accessed 09.10.2015)
10. Theobald D., inventors. *Mobile reconfigurable robot*. Patent US 8106616 B1. no. US 12/721,810, 2012. Available at: <http://www.google.com/patents/US8106616> (accessed 09.10.2015)
11. Stentz A., Herman H., Kelly A., Meyhofer E., Haynes G.C., Stager D., Zajac B., Bagnell J.A., Brindza J., Dellin C., George M., Gonzalez-Mora J., Hyde S., Jones M., Laverne M., Likhachev M., Lister L., Powers M., Ramos O., Rice D., Scheifflee J., Sidki R., Valois J.-S., Vande Weghe J.M., Wagner M.D., Wellington C. CHIMP, the CMU Highly Intelligent Mobile Platform. *Journal of Field Robotics*, 2015, vol. 32, no. 2, pp. 209–228.
12. Zhang Y., Jingru L.; Hauser K., Park H.A., Paldhe M., Lee C.S.G., Ellenberg R., Killen B., Oh P., Jun Ho Oh, Jung Ho L., Inhyeok K. Motion planning and control of ladder climbing on DRC-Hubo for DARPA Robotics Challenge. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014)*, Hong Kong, China, May 31 – June 7, 2014, pp. 2086.
13. Zucker M. Joo S., Grey M.X., Rasmussen C., Huang E., Stilman M., Bobick A., Iagnemma K., Overholt J. A General-purpose System for Teleoperation of the DRC-HUBO Humanoid Robot. *Journal of Field Robotics*, 2015, vol. 32, no. 3, pp. 336–351.
14. Kolawole E. What if this ATLAS shrugged? – DARPA unveils new humanoid robot. *Washington Post*, 2013, 12 July. Available at: <http://www.washingtonpost.com/blogs/innovations/wp/2013/07/12/what-if-this-atlas-shrugged-darpa-unveils-new-humanoid-robot/> (accessed 09.10.2015)
15. Hornyak T. Be afraid: DARPA unveils terminator-like atlas robot. *CNET*, 2013, 11 July. Available at: <http://www.cnet.com/news/be-afraid-darpa-unveils-terminator-like-atlas-robot/> (accessed 09.10.2015)
16. Upgraded atlas robot to go wireless as the stakes are raised for the DARPA robotics challenge finals. *DARPA: Defense advanced research projects agency*, 2015, 20 January. Available at: <http://www.darpa.mil/NewsEvents/Releases/2015/01/20.aspx> (accessed 09.10.2015)
17. Kuindersma S., Deits R., Fallon M., Valenzuela A., Dai H., Permenter F., Koolen T., Marion P., Tedrake R. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot. *Autonomous Robots*, 2015, 31 July. doi: 10.1007/s10514-015-9479-3. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10514-015-9479-3> (accessed 09.10.2015)
18. Fallon M., Kuindersma S., Karumanchi S., Antone M., Schneider T., Dai H., Perez-D'Arpino S., Deits R., DiCicco M., Fourie D., Koolen T., Marion P., Posa M., Valenzuela A., Kuan-Ting Y.P., Shah J.A., Iagnemma K., Tedrake R., Teller S. An architecture for online affordance-based perception and whole-body planning. *Journal of Field Robotics*, 2015, vol. 32, no. 2, pp. 229–254.
19. Kuindersma S., Permenter F., Tedrake R. An efficiently solvable quadratic program for stabilizing dynamic locomotion. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014)*, Hong Kong, China, 31 May – 7 June 2014, pp. 2589–2594. doi: 10.1109/ICRA.2014.6907230

20. Becker A., Ertel C., McLurkin J. Crowdsourcing swarm manipulation experiments: a massive online user study with large swarms of simple robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014)*, 31 May – 7 June 2014, pp. 2825–2830. doi: 10.1109/ICRA.2014.6907264

21. Bachrach J., Beal J., McLurkin J. Composable continuous-space programs for robotic swarms. *Neural Computing & Applications*, 2010, no. 19, iss. 6, pp. 825–847. doi: 10.1007/s00521-010-0382-8

22. Lee S.K., McLurkin J. Distributed cohesive configuration control for swarm robots with boundary information and network sensing. *Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*. Chicago, Illinois, USA, 14–18 September, 2014, pp. 1161–1167.

23. *Bespilotnyy samolet ZALA 421-08M* [Unmanned aircraft ZALA 421-08M]. Available at: <http://zala.aero/zala-421-08/> (accessed 09.10.2015)

24. Budaev D.S., Voshhuk G.Ju., Mochalkin A.N., Travin V.S. [The development of network-centric intelligent system of adaptive action planning group of autonomous unmanned vehicles for the implementation of the agreed problems]. *Materialy 10 Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya"* [Proceedings of the 10th Russian scientific-practical conference "Prospective systems and control problems"], Taganrog–Dombai, 2015, vol. 1, pp. 166–172.

25. *BLA T23E: bespilotnyi letatel'nyi apparat* [T23E UAV: unmanned aerial vehicle]. Available at: http://www.enics.ru/detail?product_id=20 (accessed 10.10.2015)

26. Shashok V.N., Filippov S.I., Bagaev D.V., Malyshev A.N., Kobzev A.A., Umnov V.N. [Designing manipulator to operate in extreme conditions]. *Materialy 10 Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya"* [Proceedings of the 10th Russian scientific-practical conference "Prospective systems and control problems"], Taganrog–Dombai, 2015, vol. 1, pp. 267–278.

УДК 519.2

Формализованная модель развития системы, опирающейся на принцип тяготения к заданным уровням*

Г.А. ПОПОВ

414056, РФ, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Астраханский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: popov@astu.org

Работа посвящена математической формализации процесса функционирования систем, опирающихся на принцип тяготения к заданным уровням по фиксированной совокупности показателей. Приведены некоторые примеры систем описанного типа, относящихся к сферам образования, спорта, экономики. В качестве базового примера подобной системы рассматривается система школьного образования, ориентированного на формирование у выпускников заданного набора способностей и качеств. Сформулированы и формализованы основные предположения относительно механизма формирования заданного качества у субъекта и проведен первичный анализ сформулированных предположений по требованиям их корректности и полноты. На основе сделанных предположений выведена система дифференциальных уравнений, описывающая уровень развития заданного набора качеств у субъекта в произвольный момент времени. В качестве основной характеристики развития системы взята функция числа субъектов, достигших в заданный момент времени определенного уровня развития по всей совокупности показателей. Сформулированы начальные и граничные условия этой функции, а также условия тяготения субъекта в развитии каждого из заданных качеств по отношению к некоторому заданному его уровню. Совокупность уровней развития является управляемым параметром системы. При сделанных предположениях получено дифференциальное уравнение в частных производных для указанной выше функции. В качестве входных параметров систем рассматривается функция, описывающая распределение субъектов с различными уровнями заданных качеств, интенсивность обучения субъектов и средняя интенсивность восприятия обучающего воздействия субъектом. Решение полученных уравнений позволит решить задачу выбора набора оптимальных уровней развития, при которых суммарный уровень развития всех заданных качеств по всем субъектам будет максимальным.

Ключевые слова: принцип тяготения к заданному уровню, формализованная модель, дифференциальные уравнения для уровня развития систем, воздействие на субъекта, развиваемые качества и способности, управляемые уровни развития, характеристики коллективов субъектов

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-166-177

* Статья получена 1 июня 2015 г.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема выбора принципа (назовем его принципом развития), определяющего направление и интенсивность развития конкретной системы («направление тяготения»), является одной из наиболее важных для любых систем. Это направление тяготения может быть обозначено в виде определенной цели или – более сложно – совокупности целей. Цели могут быть формализованы до уровня определенных целевых функций. В свою очередь, процесс достижения целевых значений этих функций часто сводят к процессу контроля некоторого набора (целевых) показателей, которые и определяют конкретное содержание действий всех субъектов, связанных с данной системой. Таким образом, содержание описанной пирамиды, всех происходящих в ней процессов, а также состояния, в какое придет система в результате своего развития, в существенной степени определяется выбранным принципом развития. Некоторые примеры принципов развития: тяготение к идеальному состоянию, к некоторому уровню (или уровням) развития, максимальное удаление от некоторых нежелательных состояний, обеспечение стабильности. Данная работа опирается на принцип тяготения к некоторому набору состояний. Этот принцип частично охватывает также принцип идеального состояния для случая, когда это идеальное состояние может быть описано некоторым набором уровней.

Приведем некоторые примеры подобных систем.

1. Система школьного обучения. Изначально ориентирована на выполнение требований государственного стандарта по среднему образованию, реально нацелена на достижения определенного (среднего) уровня подготовки выпускников, при котором обеспечивается сдача ЕГЭ всеми выпускниками. Таким образом, реально средняя школа функционирует по принципу тяготения к набору состояний, соответствующих сдаче ЕГЭ всеми выпускниками по заданному набору дисциплин. Отметим, что аналогично обстоит дело и в высшей школе.

2. Рыночная экономика функционирует на основе принципа идеального состояния, где под идеальным понимается состояние владения очень большой суммой денег (капиталом). Однако, государственный сектор экономики в значительной степени ориентирован на принцип тяготения к состоянию выполнения требований по заданному набору показателей.

3. Сфера спортивной подготовки ориентирована на достижение спортсменом определенного уровня по ряду спортивных качеств (физическая подготовка, волевая подготовка, быстрота реакции, уровень спортивного мышления, физические параметры спортсмена) и спортивных достижений, специфичных для каждого вида спорта. Таким образом, в сфере спортивной подготовки базовым является принцип тяготения к некоторому уровню по заданному набору показателей.

Ниже в качестве базового экземпляра, функционирующего по принципу тяготения к заданному набору состояний, рассматривается система школьного обучения. Тогда основным объектом, которого касается выбранный принцип тяготения, является ученик, более обще – субъект.

Основной целью работы является построение математической модели развития системы, функционирующей на основе принципа тяготения к заданному набору состояний.

Работ по построению формализованных моделей функционирования систем на основе определенных принципов или целевых функций крайне мало (см. [1]). Наиболее близкой является работа автора [2]. Данная работа посвящена обобщению результатов на случай наличия нескольких показателей и соответствующих им уровней тяготения. Также представляют интерес по теме исследования работы [3–5].

1. БАЗОВЫЕ ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ И ОЦЕНКА ТЕКУЩЕГО УРОВНЯ РАЗВИТИЯ СУБЪЕКТА

Приведем формализованное описание рассматриваемой в работе модели.

Имеется некоторый субъект, который характеризуется определенным набором свойств и качеств Q_1, Q_2, \dots, Q_K , где количество контролируемых качеств фиксировано. Например, в задаче обучения в средней школе таковыми качествами должны быть те качества и способности, которые школа должна вырабатывать и развивать у школьника в процессе его пребывания в стенах школы. Таковыми качествами могут быть ($K = 5$): 1) способность к саморазвитию (Q_1); 2) объем требуемых знаний (Q_2); 3) творческая активность и способность к творческой деятельности (Q_3); 4) целеустремленность (Q_4); 5) социальная креативность (Q_5). Здесь под социальной креативностью понимается способность выпускника достаточно быстро адаптироваться к новой социальной среде по месту работы, проживания, временного пребывания. Под целеустремленностью понимается не только способность упорно и последовательно добиваться поставленных целей, но и способность, правильно оценив текущую ситуацию, ставить адекватные ситуации цели или их корректировать.

Существующая среда деятельности субъекта нацелена на развитие каждого из качеств Q_i . Здесь под развитием может пониматься увеличение, усиление, улучшение каждого из качеств Q_i . Например, в задаче обучения – увеличение объема знаний у субъекта, усиление способности к саморазвитию, развитие творческих качеств и т. д. Для того чтобы обеспечить движение (изменение) субъекта в соответствии с выбранным принципом тяготения, необходимо наличие определенных воздействий на него. Все множество возможных воздействий разделим на две группы, из которых складывается результирующее воздействие на субъекта: внешние воздействия (со стороны других субъектов, обстоятельств и внешних структур) и внутренние воздействия, порождаемые непосредственно субъектом. Внешние воздействия делятся на три подгруппы: а) понуждение – создание дискомфортных, неприятных, нежелательных условий для субъекта или близких для него людей (проблемность продвижения по службе, невозможность или проблемность обеспечения требуемых условий для развития близких и др.); б) принуждение – создание условий, крайне неудобных и даже неприятных для субъекта (в частности, физическое и моральное давление на субъекта под страхом наказания); в) стимулирование – формирование набора стимулов, привлекательных для субъекта (экономических, моральных, разрешительных и др.). Внутренние механизмы воздействия можно разделить на следующие подгруппы: а) волевые качества субъекта, то есть выполнение определенных действий независимо от наличия/отсутствия внутренних стимулов; б) нали-

чие внутренних стимулов и желаний; в) наличие понимания, порождающего необходимость движения в требуемом направлении.

Предполагается, что уровень развития каждого из качеств Q_i у субъекта может быть измерен. Субъект имеет некоторый максимальный уровень развития θ_i качества Q_i , характеризующий полный объем его потенциальных возможностей по качеству Q_i .

Пусть в момент $t > 0$ субъект имеет уровень развития $v_i(t)$ по качеству Q_i ; очевидно, $\theta_i > v_i(t)$ для любого $t > 0$. Составим соотношения, описывающие изменение уровня развития за малый промежуток времени Δt при условии, что величина суммарного воздействия на субъект в момент t равна $z_i(t)$.

Сделаем ряд предположений, лежащих в основе модели. Предположим, что для всех i изменение уровня развития i -го качества Q_i за промежуток Δt прямо пропорционально следующим величинам.

1. Достигнутый уровень $v_i(t)$ развития i -го качества. Данное предположение, по-видимому, достаточно правдоподобно, когда $v(t)$ существенно меньше θ_i .

$$\Delta v_i(t) \approx \sum_{j=1}^K r_{ij} v_j(t), \quad (1)$$

или в векторной форме $\Delta v(t) \approx R \cdot v(t)$, где знак « \approx » указывает на пропорциональную (линейную) зависимость левой части от правой части, а r_{ij} – константы, не зависящие от уровня t – они определяются внутренними зависимостями качеств $\{Q_i\}$ у субъекта, $R = [r_{ij}; i, j = \overline{1; K}]$. В случае одного качества

данное условие означает, что величина $\frac{\Delta v(t)}{v(t)} 100\%$, описывающая процент

увеличения рассматриваемых способностей за малый промежуток времени Δt , постоянна и не зависит от уже достигнутого уровня. Применительно к системе школьного обучения, в частности, чем больше ученик знает (качество Q_1), тем легче ему даются новые знания, и дополнительно предполагается, что понятие «легче» описывается линейной зависимостью. Коэффициент r_{ij} в выражении (1) показывает степень зависимости качества Q_i от качества Q_j .

2. Оставшиеся потенциальные возможности субъекта $\theta_i - v_i(t)$ по каждому из качеств Q_i . По мере приближения уровня развития к максимальному дальнейшее развитие становится все более затруднительным и проблематичным ввиду ограниченности оставшихся ресурсов, что и отражено в данном предположении:

- а) в величине суммарного воздействия $z_i(t)$;
- б) в длительности воздействия Δt .

Некоторые замечания по приведенным предположениям.

Предположение 1) наименее убедительно, и поэтому, так же как и остальные предположения, требует проверки и уточнения, например, на основе проведения психологических экспериментов в форме тестирования с последующим анализом полученных результатов.

Предположение 2а) в общем случае требует уточнения, так как при уровне воздействия $z_i(t)$, большем некоторого критического значения, субъект, по-видимому, может подвергнуться определенному «разрушению», т. е. его уровень развития даже опустится ниже прежнего. Однако, в работе рассматривается случай, когда уровень воздействия на субъекта ниже критического, и поэтому предположение 2а) приемлемо.

Встает вопрос, в каких единицах и как измерять воздействие. Воздействие должно измеряться результатом его реализации. Например, для качества Q_2 (объем требуемых знаний) величина воздействия может измеряться количеством бит информации, страниц, слов и т. п., которые добавились у субъекта после реализации воздействия. Аналогично по остальным качествам в системе школьного образования. Отметим также, что целесообразно разработать процедуру оценки воздействия исходя из приведенного выше анализа структуры воздействия.

При сделанных предположениях можно записать следующее соотношение ($i = \overline{1; K}$):

$$v_i(t + \Delta t) - v_i(t) = \bar{a}_i \sum_{j=1}^K r_{ij} v_j(t) (\theta_i - v_i(t)) z_i(t) \Delta t + o(\Delta t), \quad (2)$$

где \bar{a}_i – коэффициент пропорциональности и $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{o(\Delta t)}{\Delta t} = 0$. Коэффициент пропорциональности \bar{a}_i , описывающий интенсивность развития качества Q_i у субъекта, не зависит от t , но может зависеть от индивидуальных особенностей субъекта, в частности от θ_i .

Разделив обе части выражения (1) на Δt и устремив Δt к нулю, приходим к следующей системе дифференциальных уравнений:

$$v_i'(t) = \bar{a}_i \sum_{j=1}^K r_{ij} v_j(t) (\theta_i - v_i(t)) z_i(t), \quad i = \overline{1; K}. \quad (3)$$

Полученная система не относится к классическим типам систем дифференциальных уравнений, и поэтому вопрос ее решения является отдельной задачей.

2. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЛЕКТИВОВ СУБЪЕКТОВ

На основе соотношений, характеризующих уровень развития отдельных субъектов, выведем соотношения, описывающие уровень развития множеств однотипных субъектов – коллективов субъектов. Ниже рассматривается один из наиболее важных коллективов субъектов – субъекты, однотипные по своим качествам.

Пусть $X(y, t, \theta)$ ($y = (y_1, y_2, \dots, y_K)$, $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K)$) есть число субъектов, достигших в момент t некоторого уровня развития $z = (z_1, z_2, \dots, z_K)$ такого, что $z_i \leq y_i$ для всех i и имеющих потенциальные возможности θ

($\theta_i > y_i$ для всех i). Сделаем предположение относительно граничного значения функции $X(y, t, \theta)$, а именно $X(0, t, \theta) = 0$ для любого $t > 0$. Данное условие означает, что нет субъектов с абсолютно нулевым уровнем развития, т. е. всякий субъект имеет некоторый положительный уровень развития.

Ниже предполагаются выполненными следующие условия:

а) в начальный момент $t = 0$ все субъекты имеют уровни развития по каждому признаку Q_i , пропорциональные их полным возможностям θ_i , с некоторым универсальным коэффициентом пропорциональности α_i ; тогда из определения функции $X(y, t, \theta)$ выводим, что число субъектов с уровнем развития $u = (u_1, u_2, \dots, u_K)$, $u_i \geq \alpha_i \theta_i$ для всех i , зависит только от $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K)$:

$$X(u, 0, \theta) = \begin{cases} x(\theta), & \text{если } u_i \geq \alpha_i \theta_i \text{ для всех } i, \\ 0, & \text{если } u_i < \alpha_i \theta_i \text{ хотя бы для одного } i, \end{cases} \quad (4)$$

где α_i ($0 < \alpha_i < 1$; $i = \overline{1; K}$) – константы, $x(\theta)$ – заданная функция, описывающая распределение (количество) новорожденных детей по потенциальным возможностям по качествам Q_i ;

б) необходимо также учесть, что каждый субъект в индивидуальной форме сопротивляется целенаправленному воздействию на него, и потому необходимо учесть данное явление в модели. С этой целью введем следующую характеристику: доля субъектов, воздействие на которые имеет «эффект воздействия (КПД)», лежащий в промежутке $[\tau_i, \tau_i + d\tau)$ по качеству Q_i ($0 \leq \tau_i \leq 1$; $i = \overline{1; K}$), равна $dF(\tau)$, где $\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_K)$ и $F(\tau)$ – заданная функция, описывающая распределение всех субъектов по степени воспринимаемого воздействия по качествам Q_i ($i = \overline{1; K}$). В этом случае для группы субъектов со степенью восприятия воздействия $\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_K)$ в соотношении (3) необходимо положить, что $\bar{a}_i = a_{1,i} \tau$, где $a_{1,i}$ – константа (не зависит от τ);

в) для каждого качества Q_i задан некоторый уровень b_i , на который ориентируются все субъекты; это выражается в том, что величина воздействия $z_i(t)$ в момент t на субъект с уровнем развития $v_i(t)$ равна $z_i(t) = a_{2,i}(b_i - v_i(t))$, где $a_{2,i}$ – некоторая абсолютная константа, различающаяся в случаях $b_i > v_i(t)$ и $b_i \leq v_i(t)$.

Отметим, что уровень b_i может находиться внутри области возможных значений качества Q_i . В этом случае у субъектов с уровнем качества Q_i больше, чем b_i , при функционировании на основе принципа тяготения к уровню b_i фактически происходит деградация качества Q_i . В частности, ориентация школьного образования на некоторый средний уровень, который легко доступен сильным ученикам, приводит к деградации многих из них, поскольку они теряют способности саморазвиваться и совершенствоваться. Отметим, что уровни $\{b_i\}$ являются управляющими параметрами модели, с помощью которых можно контролировать процесс развития качеств Q_i в рассматриваемом коллективе субъектов.

Ставится задача нахождения функции $X(u, t, \theta)$ при условии, что известны $x(\theta)$, α_i , $F(\tau)$, $a_{1,i}$, $a_{2,i}$ и b_i ($i = \overline{1; K}$). Предполагается, что $F(1, 1, \dots, 1) = 1$. Ниже предполагается, что $F(0) \geq 0$, т. е. на часть субъектов воздействие в течение короткого интервала времени может не оказывать никакого влияния.

Выведем уравнения для функции $X(y, t, \theta)$.

Положим $a_i \stackrel{def}{=} a_{1,i} a_{2,i}$. При $b_i > v_i(t)$ константа a_i описывает скорость возрастания возможностей субъекта по качеству Q_i , а при $b_i < v_i(t)$, что влечет $a < 0$, – скорость его деградации по качеству Q_i .

В момент $t + \Delta t$ субъекты с полными возможностями θ имеют уровень развития $y < b$, т. е. $y_i < b_i$ для всех i (число таких субъектов равно $d_y X(y, t + \Delta t, \theta)$) в следующих случаях:

1) либо в момент t эти субъекты имеют уровень развития y и за время Δt приложенное воздействие не оказало на них никакого влияния (доля таких субъектов равна $F(0)$). Число таких субъектов $F(0) d_y X(y, t, \theta)$;

2) либо в момент времени t эти субъекты были среди тех, воздействие на которых имеют КПД $\tau_i > 0$ по качеству Q_i (доля таких субъектов равна $d(F(\tau))$), эти субъекты имели уровень развития v_i по качеству Q_i и за время Δt достигли уровня развития y_i . Ясно, что v_i зависит от $y_i, \tau_i, \Delta t$, т. е. $v_i = v_i(y_i, \tau_i, \Delta t) = v_i(y_i, \tau_i, \Delta t, t) = v_i(t)$. Число таких субъектов равно $d_y X(v(y, \tau, \Delta t), t, \theta) dF(\tau)$, где

$$v(y, \tau, \Delta t) = (v_1(y_1, \tau_1, \Delta t), v_2(y_2, \tau_2, \Delta t), \dots, v_K(y_K, \tau_K, \Delta t)).$$

Из вышесказанного, суммируя по возможным значениям $\tau_i > 0$ ($i = \overline{1; K}$), получаем соотношение

$$d_y X(y, t + \Delta t, \theta) = F(0) d_y X(y, t, \theta) + \int_{\tau_1=0+}^1 \int_{\tau_2=0+}^1 \dots \int_{\tau_K=0+}^1 d_y X(v(y, \tau, \Delta t), t, \theta) dF(\tau), \quad (5)$$

причем в силу выражения (2) и условия (в) имеет место равенство

$$y_i - v_i(y_i, \tau_i, \Delta t) = a_i \tau_i \sum_{j=1}^K r_{ij} v_j(t) (\theta_i - v_i(y, \tau, \Delta t)) (b - v(y, \tau, \Delta t)) \Delta t + o(\Delta t). \quad (6)$$

Из выражения (5), интегрируя по y_i от 0 до $z_i (< b_i)$ ($i = \overline{1; K}$), получаем

$$\lim_{\Delta t \downarrow 0} \frac{X(z, t + \Delta t, \theta) - X(z, t, \theta)}{\Delta t} =$$

$$\begin{aligned}
 &= \lim_{\Delta t \downarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \left\{ \int_{\tau_1=0+}^1 \int_{\tau_2=0+}^1 \dots \int_{\tau_K=0+}^1 X(v(y, \tau, \Delta t), t, \theta) dF(\tau) - (1 - F(0))X(z, t, \theta) \right\} = \\
 &= \lim_{\Delta t \downarrow 0} \int_{\tau_1=0+}^1 \int_{\tau_2=0+}^1 \dots \int_{\tau_K=0+}^1 \frac{X(v(z, \tau, \Delta t), t, \theta) - X(z, t, \theta)}{\Delta t} dF(\tau). \quad (7)
 \end{aligned}$$

Из равенства (6) имеем $\lim_{\Delta t \downarrow 0} v(z_i, \tau_i, \Delta t) = z_i$ и

$$\lim_{\Delta t \downarrow 0} \frac{z_i - v_i(z_i, \tau_i, \Delta t)}{\Delta t} = a_i \tau_i \sum_{j=1}^K r_{ij} v_j(t) (\theta_i - v_i(y, \tau, \Delta t)) (b - v(y, \tau, \Delta t)).$$

Отсюда выводим

$$\begin{aligned}
 &\lim_{\Delta t \downarrow 0} \frac{X(v_1, v_2, \dots, v_i, z_{i+1}, z_{i+2}, \dots, z_K, t, \theta) - X(v_1, v_2, \dots, v_{i-1}, z_i, z_{i+1}, \dots, z_K, t, \theta)}{\Delta t} = \\
 &= \lim_{\Delta t \downarrow 0} \frac{X(v_1, v_2, \dots, v_i, z_{i+1}, z_{i+2}, \dots, z_K, t, \theta) - X(v_1, v_2, \dots, v_{i-1}, z_i, z_{i+1}, \dots, z_K, t, \theta)}{v_i(z_i, \tau_i, \Delta t) - z_i} \times \\
 &\quad \times \lim_{\Delta t \downarrow 0} \frac{v(x_i, \tau_i, \Delta t), t, \theta - z_i}{\Delta t} = \\
 &= \frac{\partial X(z, t, \theta)}{\partial z_i} \left(-a_i \tau_i \sum_{j=1}^K r_{ij} v_j(t) (\theta_i - v_i(y, \tau, \Delta t)) (b - v(y, \tau, \Delta t)) \right). \quad (8)
 \end{aligned}$$

На основе представления

$$\begin{aligned}
 &X(v(z, \tau, \Delta t), t, \theta) - X(z, t, \theta) = \\
 &= \sum_{i=2}^K X(v_1, v_2, \dots, v_i, z_{i+1}, z_{i+2}, \dots, z_K, t, \theta) - X(v_1, v_2, \dots, v_{i-1}, z_i, z_{i+1}, \dots, z_K, t, \theta)
 \end{aligned}$$

и соотношения (8) получаем

$$\begin{aligned}
 &\lim_{\Delta t \downarrow 0} \frac{X(v(x, \tau, \Delta t), t, \theta) - X(z, t, \theta)}{\Delta t} = \\
 &= \sum_{i=2}^K \frac{\partial X(z, t, \theta)}{\partial z_i} \left(-a_i \tau_i \sum_{j=1}^K r_{ij} v_j(t) (\theta_i - v_i(y, \tau, \Delta t)) (b_i - v_i(y, \tau, \Delta t)) \right)
 \end{aligned}$$

Подставив последнее соотношение в (7), окончательно получаем

$$\begin{aligned}
 &\frac{\partial X(z, t, \theta)}{\partial t} = \\
 &= \int_{\tau_1=0+}^1 \int_{\tau_2=0+}^1 \dots \int_{\tau_K=0+}^1 \sum_{i=2}^K \frac{\partial X(z, t, \theta)}{\partial z_i} \left(-a_i \tau_i \sum_{j=1}^K r_{ij} z_j (\theta_i - z_i) (b_i - z_i) \right) dF(\tau)
 \end{aligned}$$

или

$$\frac{\partial X(z, t, \theta)}{\partial t} + \sum_{i=2}^K \frac{\partial X(z, t, \theta)}{\partial z_i} \left(a_i \gamma_i \sum_{j=1}^K r_{ij} z_j (\theta_i - z_i) (b_i - z_i) \right) = 0, \quad (9)$$

где $\gamma_i = \int_0^1 \tau_i dF(\tau)$ – средняя величина воздействия по качеству Q_i .

Просмотрев вывод (9), нетрудно убедиться в его справедливости и в случае, когда для некоторых i выполнено условие $b_i \leq y_i < \theta_i$.

Таким образом, решение уравнения в частных производных (9) при начальном условии (4) и граничном условии $X(0, t, \theta) = 0$ для любого $t > 0$ позволяет найти функцию $X(z, t, \theta)$, где функции $\{v_j(t)\}$ находятся как решения системы (3). Уравнение (9) относится к классу линейных дифференциальных уравнений с частными производными и может быть исследовано на основе разработанных в этом направлении методов [12, 16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены базовые соотношения для распределения субъектов по уровню развития их различных способностей. Решение полученных соотношений и анализ свойств полученных решений требует проведения дальнейших исследований. Также требуют анализа исходные предположения, функции и параметры $x(\theta)$, α_i , γ_i , $a_{1,i}$, $a_{2,i}$, на основе которых получены результирующие уравнения (3) и (9). Таким образом, для завершения поставленной в работе задачи необходимо проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Решение поставленной в работе задачи открывает возможности для постановки оптимизационных задач, связанных с выбором оптимальных управлений, обеспечивающих наибольший суммарный объем требуемых качеств в любом из возможных аспектов, в частности, на определенный момент времени, по всей или определенной части совокупности субъектов, по суммарным характеристикам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Войтелева Т.М.* Личностно ориентированное обучение как способ развития творческих способностей учащихся средней школы // Вестник МГГУ им. М.А. Шолохова. Филологические науки. – 2012. – № 1. – С. 83–86.
2. *Попов Г.А.* Модель оценки уровня развития самообучающейся системы // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2008. – № 2 (43). – С. 251–257.
3. *Попов Г.А., Попова Е.А.* Классификация функций и задач вуза на основе метода Сагатовского // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – № 1. – С. 7–17.
4. *Лантес В.В.* Метод оценивания умений и навыков при обучении программированию // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2013. – № 1. – С. 194–201.

5. Яковлев П.В., Яковлева М.Ю. Моделирование циклических процессов в образовательных системах // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2012. – № 2. – С. 197–202.
6. Лантев А.А. Математическое моделирование этносоциальных процессов / Омский государственный университет. – Омск, 1997. – 26 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 24.09.97, № 2904-V1997.
7. Гуц А.К. Глобальная этносоциология: учебное пособие. – Омск: Изд-во ОмГУ, 1997. – 212 с.
8. Парсонс Т. Понятие общества: компоненты и их взаимоотношения // Толкотт Парсонс (1902–1973): сборник статей. – М.: ИНИОН, 1994. – С. 104–153. – (Современная западная теоретическая социология / ИНИОН РАН; вып. 2).
9. Парсонс Т. Функциональная теория изменения // Американская социологическая мысль: хрестоматия / Р. Мертон, Дж. Мид, Т. Парсонс, А. Шюц; под ред. В.А. Добренькова; сост. Е.И. Кравченко. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – С. 464–480.
10. Гуц А.К., Лантев А.А. Рождение циклов в развитии политической и экономической систем вследствие ослабления режимов власти // Циклы природы и общества: материалы IV международной научно-практической конференции «Циклы природы и общества», 13–20 октября 1996 г. – Ставрополь: Изд-во Ставроп. ун-та, 1996. – Ч. 1. – С. 198–199.
11. Марсден Дж., Мак-Кракен М. Бифуркация рождения цикла и ее приложения / пер. с англ. Л.М. Лермана. – М.: Мир, 1980. – 368 с.
12. Терехин М.Т. Бифуркация систем дифференциальных уравнений: учебное пособие к спецкурсу. – М.: Прометей, 1989. – 88 с.
13. Хэссард Б. Теория и приложения бифуркации рождения цикла. – М.: Мир, 1985. – 280 с.
14. Кудинов Ю.И., Дорохов И.Н., Пащенко Ф.Ф. Нечеткие регуляторы и системы управления // Проблемы управления. – 2004. – № 3. – С. 2–14.
15. Вешнева И.В. Математические модели в системе управления качеством высшего образования с использованием методов нечеткой логики: монография. – Саратов: Саратовский источник, 2010. – 187 с.
16. Петровский И.Г. Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Физматлит, 1973. – 207 с.

Попов Георгий Александрович, доктор технических наук, профессор Астраханского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: математическое моделирование систем, информационная безопасность, системный анализ. Имеет более 150 публикаций. E-mail: popov@astu.org

A formalized model of system development, based on the principle of gravitation to specific levels*

G.A. POPOV

Astrakhan State Technical University, 16 Tatischev Str., Astrakhan, 414056, Russian Federation, D.Sc. (Eng.) professor. E-mail: popov@astu.org

The work is devoted to the mathematical formalization of the process of system functioning based on the principle of gravitation to specified levels with a fixed set of indicators. The system of school education focused on developing a given set of abilities and qualities is given as a basic example of such a system. Basic assumptions concerning the mechanism of formation of a given quality in a subject are formulated and formalized. Based on these assumptions a system of differential equations describing the level of development of a given set of qualities at an arbitrary time is derived. The number of subjects who attained a certain level of

* Received 1 June 2015.

development of a whole set of indicators is taken as the main characteristic of system development. Initial and boundary conditions of this function and the conditions of gravitation of the subject in the development of each of the specified qualities with respect to some specified level are formulated. All required development levels are controlled system parameters. When all the assumptions are made, a partial differential equation is derived for the above function. The function describing the distribution of subjects with different levels of desired characteristics, the intensity of training subjects and an average intensity of perception of the educational influence of the subject are input system parameters. The solution of the resulting equations will solve the problem of choosing an optimal set of development levels on which the total level of development of all specified qualities in all subjects will be maximized.

Keywords: principle of gravitation to the desired level, formal model, differential equation for the of system development level, impact on the subject, developed qualities and abilities, controlled levels of development, characteristics of subject groups

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-166-177

REFERENCES

1. Voiteleva T.M. Lichnostno orientirovannoe obuchenie kak sposob razvitiya tvorcheskikh sposobnostei uchashchikhsya srednei shkoly [Personally oriented training as a way of development of creative abilities of high school students]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gumanitarnogo universiteta im. M.A. Sholokhova. Filologicheskie nauki – Vestnik of Sholokhov Moscow State University for the Humanities: "Philology" Series*, 2012, no. 1, pp. 83–86.
2. Popov G.A. Model' otsenki urovnya razvitiya samoobuchayushcheisya sistemy [The model of estimation of selfteaching system's development level]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Astrakhan State Technical University*, 2008, no. 2 (43), pp. 251–257.
3. Popov G.A., Popova E.A. Klassifikatsiya funktsii i zadach vuza na osnove metoda Sagatovskogo [Classification of functions and problems of a university based on Sagatovski's method]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2009, no. 1, pp. 7–17.
4. Laptev V.V. Metod otsenivaniya umenii i navykov pri obuchenii programmirovaniyu [Skills rating method for programming education]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2013, no. 1, pp. 194–201.
5. Yakovlev P.V., Yakovleva M.Yu. Modelirovanie tsiklicheskikh protsessov v obrazovatel'nykh sistemakh [Modelling of cyclic processes in educational systems]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2012, no. 2, pp. 197–202.
6. Laptev A.A. *Mathematical modeling of the ethno-social processes*. Omsk, 1997. 26 p. Available from VINITI RAS, no. 2904-B1997. (In Russian)
7. Guts A.K. *Global'naya etnosotsiologiya* [Global ethnic sociology]. Omsk, OmSU Publ., 1997. 212 p.
8. Parsons T. [Concept of society: the components and their interrelationships]. *Sovremennaya zapadnaya teoreticheskaya sotsiologiya. Tolkott Parsons (1902–1973). Sbornik statei* [Modern Western theoretical sociology. Collection of papers]. Moscow, INION Publ., 1994, iss. 2, pp. 104–153.
9. Parsons T. Funktsional'naya teoriya izmeneniya [Functional theory changes]. Merton R., Mid Dzh., Parsons T., Shyuts A. *Amerikanskaya sotsiologicheskaya mysl'. Khrestomatiya* [American sociological thought. Chrestomathy]. Translated from English. Ed. by V.A. Dobren'kov, comp. E.I. Kravchenko. Moscow, MSU Publ., 1994, pp. 464–480.
10. Guts A.K., Laptev A.A. [Birth cycles in the development of political and economic systems due to the weakening of the power modes]. *Materialy IV mezhdunarodnoi konferentsii «Tsikly prirody i obshchestva»*, 13–20 oktyabrya 1996 g. Ch. 1 [Proceedings of the IV International scientific-

practical Conference "The cycles of Nature and Society", 13–20 October 1996]. Stavropol', 1996, pt. 1, pp. 198–199.

11. Marsden J.E., McCracken M. *The hopf bifurcation and its applications*. New York, Springer-Verlag, 1976. xiii, 408 p. (Russ. ed.: Marsden Dzh., Mak-Kraken M. *Bifurkatsiya rozhdeniya tsikla i ee prilozheniya*. Translated from English L.M. Lerman. Moscow, Mir Publ., 1980. 368 p.).

12. Terekhin M.T. *Bifurkatsiya sistem differentsial'nykh uravnenii* [Bifurcation of systems of differential equations]. Moscow, Prometei Publ., 1989. 88 p.

13. Hassard B.D., Kazarinoff N.D., Wan Y.-H. *Theory and applications of hopf bifurcation*. New York, Cambridge University Press, 1981. 311 p. (Russ. ed.: Khessard B. *Teoriya i prilozheniya bifurkatsii rozhdeniya tsikla*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1985. 280 p.).

14. Kudinov Yu.I., Dorokhov I.N., Pashchenko F.F. Nechetkie regulatory i sistemy upravleniya [Fuzzy controllers and control systems]. *Problemy upravleniya – Control Sciences*, 2004, no. 3, pp. 2–14.

15. Veshneva I.V. *Matematicheskie modeli v sisteme upravleniya kachestvom vysshego obrazovaniya s ispol'zovaniem metodov nechetkoi logiki*. Monografiya [Mathematical models in the quality management system of higher education with the use of fuzzy logic methods. Monograph]. Saratov, Saratovskii istochnik Publ., 2010. 187 p.

16. Petrovskii I.G. *Lektsii po teorii obyknovennykh differentsial'nykh uravnenii* [Lectures on ordinary differential equations]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 207 p.

УДК 618.5.015

Особенности задачи планирования эксперимента для гауссовских линейных систем*

В.М. ЧУБИЧ¹, О.С. ЧЕРНИКОВА²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, заведующий кафедрой теоретической и прикладной информатики. E-mail: chubich@ami.nstu.ru.

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной информатики. E-mail: lchernikova@corp.nstu.ru.

Процедуры активной параметрической идентификации заключаются в сочетании традиционных методов параметрического оценивания с методами планирования эксперимента. При заданной структуре математической модели процедура активной параметрической идентификации предполагает выполнение следующих этапов: вычисление оценок неизвестных параметров по измерительным данным, соответствующим некоторому плану эксперимента; синтез на основе полученных оценок оптимального плана эксперимента; пересчет оценок гауссовских параметров по измерительным данным, соответствующим оптимальному плану. Применение идей и методов современной теории планирования эксперимента при построении математических моделей стохастических динамических систем способствует повышению эффективности и качества проводимых научных исследований. При этом центральное место в процедурах активной параметрической идентификации занимает вычисление информационной матрицы Фишера, фигурирующей в соответствующих критериях оптимальности плана. В данной работе проводится теоретический анализ выражения информационной матрицы Фишера для моделей гауссовских линейных дискретных и непрерывно-дискретных систем, в результате которого устанавливается, что при определенных параметризациях модельных структур (неизвестные параметры входят в различных комбинациях в ковариационные матрицы шума системы, шума измерения и вектора начальных условий) информационная матрица Фишера, оставаясь постоянной, не зависит от входного сигнала и математического ожидания вектора начальных условий. Авторы приходят к важному для практики выводу о параметризациях моделей дискретных и непрерывно-дискретных систем, при которых планирование входных сигналов и начальных условий не позволяет повысить качество параметрического оценивания. В этом случае применение процедуры активной параметрической идентификации не дает положительного эффекта по сравнению с традиционным оцениванием неизвестных параметров.

Ключевые слова: дискретная система, непрерывно-дискретная система, шум системы, шум измерения, неизвестные параметры, информационная матрица Фишера, планирование эксперимента, фильтр Калмана

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-178-191

* Статья получена 01 июня 2015 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (№ 2014/138, проект № 1689).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент эффективность и целесообразность планирования эксперимента при построении моделей динамических систем в пространстве состояний продемонстрирована во многих работах (см., например, [1–12]).

Одно из центральных мест в теории планирования эксперимента занимает информационная матрица Фишера (ИМФ), используемая при построении информационной матрицы всего плана и фигурирующая в алгоритмах численного построения оптимальных планов.

В данной статье авторы проводят теоретический анализ формальных соотношений для ИМФ и приходят к важному для практики выводу о параметризациях моделей дискретных и непрерывно-дискретных систем, при которых планирование эксперимента не позволяет повысить качество параметрического оценивания.

1. СТРУКТУРНО-ВЕРОЯТНОСТНОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ

Будем рассматривать следующие модели идентифицируемых, управляемых и наблюдаемых стохастических дискретных и непрерывно-дискретных систем.

А. Гауссовская линейная дискретная модель

$$x(t_{k+1}) = F(t_k)x(t_k) + \Psi(t_k)u(t_k) + \Gamma(t_k)w(t_k), \quad (1)$$

$$y(t_{k+1}) = H(t_{k+1})x(t_{k+1}) + v(t_{k+1}), \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2)$$

где $x(t_k)$ – вектор состояния; $u(t_k)$ – вектор управления (входа); $w(t_k)$ – вектор шума системы; $y(t_{k+1})$ – вектор измерения (выхода); $v(t_{k+1})$ – вектор шума измерения.

Предположим следующее:

- случайные векторы $w(t_k)$ и $v(t_{k+1})$ образуют стационарные белые гауссовские последовательности, для которых

$$E[w(t_k)] = 0, \quad E[w(t_k)w^T(t_i)] = Q\delta_{ki}$$

($E[\cdot]$ оператор математического ожидания, δ_{ki} – символ Кронекера),

$$E[v(t_k)] = 0, \quad E[v(t_{k+1})v^T(t_{i+1})] = R\delta_{ki}, \quad E[v(t_k)w^T(t_i)] = 0, \\ k, i = 0, 1, \dots, N-1;$$

- начальное состояние $x(t_0)$ имеет нормальное распределение с параметрами

$$E[x(t_0)] = \bar{x}(t_0), \quad E\left\{[x(t_0) - \bar{x}(t_0)][x(t_0) - \bar{x}(t_0)]^T\right\} = P(t_0)$$

и не коррелирует с $w(t_k)$ и $v(t_{k+1})$ при любых значениях переменной k .

Б. Гауссовская линейная непрерывно-дискретная модель

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + \Psi(t)u(t) + \Gamma(t)w(t), \quad t \in [t_0, t_N], \quad (3)$$

$$y(t_{k+1}) = H(t_{k+1})x(t_{k+1}) + v(t_{k+1}), \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (4)$$

где $x(t)$ – вектор состояния; $u(t)$ – вектор управления (входа); $w(t)$ – вектор шума системы; $y(t_{k+1})$ – вектор измерения (выхода); $v(t_{k+1})$ – вектор шума измерения.

Предположим следующее:

• случайные векторы $w(t)$ и $v(t_{k+1})$ являются стационарными белыми гауссовскими шумами, для которых

$$E[w(t)] = 0, \quad E[w(t)w^T(\tau)] = Q\delta(t - \tau)$$

($\delta(t - \tau)$ – дельта-функция Дирака),

$$E[v(t_{k+1})] = 0, \quad E[v(t_{k+1})v^T(t_{i+1})] = R\delta_{ki}, \quad E[v(t_{k+1})w^T(\tau)] = 0, \\ \forall t_k, \tau, \quad \tau \in [t_0, t_N], \quad k, i = 0, 1, \dots, N-1;$$

• начальное состояние $x(t_0)$ имеет нормальное распределение с параметрами

$$E[x(t_0)] = \bar{x}(t_0), \quad E\left\{[x(t_0) - \bar{x}(t_0)][x(t_0) - \bar{x}(t_0)]^T\right\} = P(t_0)$$

и не коррелирует с $w(t)$ и $v(t_{k+1})$ при любых значениях переменной t и k .

В моделях (1), (2) и (3), (4) матрицы Q , R и $P(t_0)$ могут зависеть от неизвестных параметров $\Theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s) \in \Omega_\Theta$. Проанализируем выражения для ИМФ при указанных параметризациях моделей.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИМФ

Если планировать входные сигналы и начальные условия, то в соответствии с [13–15] элементы ИМФ, зависящие в данном случае от неизвестных параметров Θ , определяются равенством

$$M_{ij}(U, \bar{x}(t_0); \Theta) = -E \left[\frac{\partial^2 \ln L(U, \bar{x}(t_0); \Theta)}{\partial \Theta_i \partial \Theta_j} \right], \quad i, j = 1, 2, \dots, s,$$

в котором усреднение берется по выборочному пространству и $L(U, \bar{x}(t_0); \Theta)$ – функция правдоподобия.

Как показано в работе [10], при наиболее общем характере вхождения неизвестных параметров для математической модели (1) и (2) при высказанных априорных предположениях элементы ИМФ могут быть представлены в виде

$$M_{ij}(U, \bar{x}(t_0); \Theta) = W_{ij}(U, \bar{x}(t_0); \Theta) + V_{ij}(\Theta), \quad (5)$$

где (см. дополнительно работу [16])

$$\begin{aligned} W_{ij}(U, \bar{x}(t_0); \Theta) = & \\ = \sum_{k=0}^{N-1} & \left\{ Sp \left[C_0 \bar{x}_A(t_{k+1}) \bar{x}_A^T(t_{k+1}) C_0^T \frac{\partial H^T(t_{k+1})}{\partial \theta_j} B^{-1}(t_{k+1}) \frac{\partial H(t_{k+1})}{\partial \theta_i} \right] + \right. \\ & + Sp \left[C_0 \bar{x}_A(t_{k+1}) \bar{x}_A^T(t_{k+1}) C_j^T H^T(t_{k+1}) B^{-1}(t_{k+1}) \frac{\partial H(t_{k+1})}{\partial \theta_i} \right] + \\ & + Sp \left[C_i \bar{x}_A(t_{k+1}) \bar{x}_A^T(t_{k+1}) C_0^T \frac{\partial H(t_{k+1})}{\partial \theta_j} B^{-1}(t_{k+1}) H(t_{k+1}) \right] + \\ & \left. + Sp \left[C_i \bar{x}_A(t_{k+1}) \bar{x}_A^T(t_{k+1}) C_j^T H^T(t_{k+1}) B^{-1}(t_{k+1}) H(t_{k+1}) \right] \right\}. \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{ij}(\Theta) = & \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ Sp \left[C_0 \Sigma_A(t_{k+1}) C_0^T \frac{\partial H^T(t_{k+1})}{\partial \theta_j} B^{-1}(t_{k+1}) \frac{\partial H(t_{k+1})}{\partial \theta_i} \right] + \right. \\ & + Sp \left[C_0 \Sigma_A(t_{k+1}) C_j^T H^T(t_{k+1}) B^{-1}(t_{k+1}) \frac{\partial H(t_{k+1})}{\partial \theta_i} \right] + \\ & + Sp \left[C_i \Sigma_A(t_{k+1}) C_0^T \frac{\partial H(t_{k+1})}{\partial \theta_j} B^{-1}(t_{k+1}) H(t_{k+1}) \right] + \\ & + Sp \left[C_i \Sigma_A(t_{k+1}) C_0^T \frac{\partial H(t_{k+1})}{\partial \theta_j} B^{-1}(t_{k+1}) H(t_{k+1}) \right] + \\ & + Sp \left[C_i \Sigma_A(t_{k+1}) C_j^T H^T(t_{k+1}) B^{-1}(t_{k+1}) H(t_{k+1}) \right] \left. \right\} + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} Sp \left[\frac{\partial B(t_{k+1})}{\partial \theta_i} B^{-1}(t_{k+1}) \frac{\partial B(t_{k+1})}{\partial \theta_j} B^{-1}(t_{k+1}) \right]. \quad (7) \end{aligned}$$

Здесь

$$C_i = \left[\underbrace{O, \dots, O}_i, I, O, \dots, O \right];$$

$$K_A(t_k) = \begin{bmatrix} K(t_k) \\ \frac{\partial K(t_k)}{\partial \theta_1} \\ \dots \\ \frac{\partial K(t_k)}{\partial \theta_s} \end{bmatrix}; \tag{8}$$

$$\Psi_A(t_k) = \begin{bmatrix} \Psi(t_k) \\ \frac{\partial \Psi(t_k)}{\partial \theta_1} \\ \dots \\ \frac{\partial \Psi(t_k)}{\partial \theta_s} \end{bmatrix}; \tag{9}$$

$$F_A(t_k) = \begin{bmatrix} F(t_k) & O & \dots & O \\ \frac{\partial F(t_k)}{\partial \theta_1} - \tilde{K}(t_k) \frac{\partial H(t_k)}{\partial \theta_1} & F(t_k) - \tilde{K}(t_k)H(t_k) & \dots & O \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial F(t_k)}{\partial \theta_s} - \tilde{K}(t_k) \frac{\partial H(t_k)}{\partial \theta_s} & O & \dots & F(t_k) - \tilde{K}(t_k)H(t_k) \end{bmatrix}; \tag{10}$$

$$\tilde{K}(t_k) = F(t_k)K(t_k);$$

$$\bar{x}_A(t_{k+1}) = \begin{bmatrix} \bar{x}(t_{k+1}) \\ \frac{\partial \bar{x}(t_{k+1})}{\partial \theta_1} \\ \dots \\ \frac{\partial \bar{x}(t_{k+1})}{\partial \theta_s} \end{bmatrix} = \begin{cases} F_A(t_k)\bar{x}_A(t_k) + \Psi_A(t_k)u(t_k), & k=1, 2, \dots, N-1, \\ \begin{bmatrix} F(t_0)\bar{x}(t_0) + \Psi(t_0)u(t_0) \\ \frac{\partial F(t_0)}{\partial \theta_1} \bar{x}(t_0) + F(t_0) \frac{\partial \bar{x}(t_0)}{\partial \theta_1} \\ \dots \\ \frac{\partial F(t_0)}{\partial \theta_s} \bar{x}(t_0) + F(t_0) \frac{\partial \bar{x}(t_0)}{\partial \theta_s} \end{bmatrix}, & k=0. \end{cases} \tag{11}$$

$$\Sigma_A(t_{k+1}) = \begin{cases} F_A(t_k)\Sigma_A(t_k)F_A^T(t_k) + K_A(t_k)B(t_k)K_A^T(t_k), & k = 1, 2, \dots, N-1. \\ O, & k = 0. \end{cases}$$

Матрицы $K(t_{k+1})$ и $B(t_{k+1})$ определяются по следующим рекуррентным уравнениям дискретного фильтра Калмана:

$$K(t_{k+1}) = P(t_{k+1} | t_k)H^T(t_{k+1})[B(t_{k+1})]^{-1};$$

$$B(t_{k+1}) = H(t_{k+1})P(t_{k+1} | t_k)H^T(t_{k+1}) + R;$$

$$P(t_{k+1} | t_k) = F(t_k)P(t_k | t_k)F^T(t_k) + \Gamma(t_k)Q\Gamma^T(t_k);$$

$$P(t_{k+1} | t_{k+1}) = [I - K(t_{k+1})H(t_{k+1})]P(t_{k+1} | t_k).$$

Поскольку в нашем случае неизвестные параметры в матрицу $H(t_{k+1})$ не входят, то выражение (6) существенно упрощается и приобретает вид

$$W_{ij}(U, \bar{x}(t_0); \Theta) = \sum_{k=0}^{N-1} Sp \left[C_i \bar{x}_A(t_{k+1}) \bar{x}_A^T(t_{k+1}) C_j^T H^T(t_{k+1}) B^{-1}(t_{k+1}) H(t_{k+1}) \right]. \quad (12)$$

Покажем теперь, что $W_{ij}(U, \bar{x}(t_0); \Theta) = O$.

В силу того, что параметры не входят также в матрицы $F(t_k)$, $\Psi(t_k)$, выражения (9)–(11) можно переписать так:

$$\Psi_A(t_k) = \begin{bmatrix} \Psi(t_k) \\ O \\ \dots \\ O \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$F_A(t_k) = \begin{bmatrix} F(t_k) & O & \dots & O \\ O & F(t_k) - \tilde{K}(t_k)H(t_k) & \dots & O \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ O & O & \dots & F(t_k) - \tilde{K}(t_k)H(t_k) \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$\bar{x}_A(t_{k+1}) = \begin{cases} F_A(t_k)\bar{x}_A(t_k) + \Psi_A(t_k)u(t_k), & k = 1, 2, \dots, N-1; \\ \begin{bmatrix} F(t_0)\bar{x}(t_0) + \Psi(t_0)u(t_0) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, & k = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Воспользовавшись методом математической индукции, установим, что вектор $\bar{x}_A(t_{k+1})$ имеет следующую структуру:

$$\bar{x}_A(t_{k+1}) = \begin{bmatrix} \bar{x}(t_{k+1}) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Действительно, для $k=0$

$$\bar{x}_A(t_1) = \begin{bmatrix} F(t_0)\bar{x}(t_0) + \Psi(t_0)u(t_0) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}(t_1) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Предположим, что для $k=n-1$ верно равенство

$$\bar{x}_A(t_n) = \begin{bmatrix} \bar{x}(t_n) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Тогда для $k=n$ из (9)–(11) следует, что

$$\begin{aligned} \bar{x}_A(t_{n+1}) &= F_A(t_n)\bar{x}_A(t_n) + \Psi_A(t_n)u(t_n) = \\ &= \begin{bmatrix} F(t_n)x(t_n) + \Psi(t_n)u(t_n) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}(t_{n+1}) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Принимая во внимание соотношение (16) и особенность структуры матриц C_i , получаем

$$C_i \bar{x}_A(t_{k+1}) = \begin{bmatrix} \underbrace{O, \dots, O}_i, I, O, \dots, O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(t_{k+1}) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = O,$$

что в соответствии с выражением (12) влечет за собой $W_{ij}(U, \bar{x}(t_0); \Theta) = O$ и, следовательно, $M_{ij}(U, \bar{x}(t_0); \Theta) = V_{ij}(\Theta)$, $\forall i, j = 1, 2, \dots, s$.

Таким образом, показано, что ИМФ не зависит от входного сигнала и вектора начальных условий в случае, если неизвестные параметры содержатся в матрицах Q , R и $P(t_0)$.

Перейдем к анализу выражения ИМФ для гауссовских линейных непрерывно-дискретных моделей. Как установлено в [17], для математической модели (3) и (4) при наиболее общем характере вхождения неизвестных параметров с учетом сделанных априорных предположений элементы ИМФ могут быть также представлены в виде выражения (5). Такими же остаются выражения для $W_{ij}(U, \bar{x}(t_0); \Theta)$ и $V_{ij}(\Theta)$ (см., соответственно, формулы (6) и (7)), но $\bar{x}_A(t_{k+1})$ и $\Sigma_A(t_{k+1})$ в этом случае вычисляются иначе [18]:

$$\bar{x}_A(t_{k+1}) = \begin{cases} \Phi_A(t_{k+1}, t_k)\bar{x}_A(t_k) + \Psi_A(t_{k+1}, t_k)u(t_k), & \text{если } k = 1, 2, \dots, N-1; \\ \left[\begin{array}{c} \Phi(t_1, t_0)\bar{x}(t_0) + \int_{t_0}^{t_1} \Phi(t_1, \tau)\Psi(\tau)u(\tau)d\tau \\ \frac{\partial\Phi(t_1, t_0)}{\partial\theta_1}\bar{x}(t_0) + \Phi(t_1, t_0)\frac{\partial\bar{x}(t_0)}{\partial\theta_1} + \int_{t_0}^{t_1} \left[\frac{\partial\Phi(t_1, \tau)}{\partial\theta_1}\Psi(\tau)u(\tau) + \Phi(t_1, \tau)\frac{\partial\Psi(\tau)}{\partial\theta_1}u(\tau) \right] d\tau \\ \dots \\ \frac{\partial\Phi(t_1, t_0)}{\partial\theta_s}\bar{x}(t_0) + \Phi(t_1, t_0)\frac{\partial\bar{x}(t_0)}{\partial\theta_s} + \int_{t_0}^{t_1} \left[\frac{\partial\Phi(t_1, \tau)}{\partial\theta_s}\Psi(\tau)u(\tau) + \Phi(t_1, \tau)\frac{\partial\Psi(\tau)}{\partial\theta_s}u(\tau) \right] d\tau \end{array} \right]; & \text{если } k = 0. \end{cases} \quad (17)$$

$$\Sigma_A(t_{k+1}) = \begin{cases} \Phi_A(t_{k+1}, t_k)\Sigma_A(t_k)\Phi_A^T(t_{k+1}, t_k) + K_A(t_{k+1}, t_k)B(t_k)K_A^T(t_{k+1}, t_k), & k = 1, 2, \dots, N-1; \\ O, & k = 0; \end{cases}$$

$$\Phi_A(t_{k+1}, t_k) = \begin{bmatrix} \Phi(t_{k+1}, t_k) & O & \dots & O \\ \frac{\partial\Phi(t_{k+1}, t_k)}{\partial\theta_1} - \tilde{K}(t_{k+1}, t_k)\frac{\partial H(t_k)}{\partial\theta_1} & \Phi_A(t_{k+1}, t_k) & \dots & O \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial\Phi(t_{k+1}, t_k)}{\partial\theta_s} - \tilde{K}(t_{k+1}, t_k)\frac{\partial H(t_k)}{\partial\theta_s} & O & \dots & \Phi_A(t_{k+1}, t_k) \end{bmatrix}; \quad (18)$$

$$a_A(t_{k+1}, t_k) = \begin{bmatrix} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \Phi(t_{k+1}, \tau) \Psi(\tau) u(\tau) d\tau \\ \int_{t_k}^{t_{k+1}} \left[\frac{\partial \Phi(t_{k+1}, \tau)}{\partial \theta_1} \Psi(\tau) u(\tau) + \Phi(t_{k+1}, \tau) \frac{\partial \Psi(\tau)}{\partial \theta_1} u(\tau) \right] d\tau \\ \dots \\ \int_{t_k}^{t_{k+1}} \left[\frac{\partial \Phi(t_{k+1}, \tau)}{\partial \theta_s} \Psi(\tau) u(\tau) + \Phi(t_{k+1}, \tau) \frac{\partial \Psi(\tau)}{\partial \theta_s} u(\tau) \right] d\tau \end{bmatrix}; \quad (19)$$

$$K_A(t_{k+1}, t_k) = \begin{bmatrix} \tilde{K}(t_{k+1}, t_k) \\ \frac{\partial \tilde{K}(t_{k+1}, t_k)}{\partial \theta_1} \\ \dots \\ \frac{\partial \tilde{K}(t_{k+1}, t_k)}{\partial \theta_s} \end{bmatrix};$$

$$\tilde{K}(t_{k+1}, t_k) = \Phi(t_{k+1}, t_k) K(t_k);$$

$$\Phi_A(t_{k+1}, t_k) = \Phi(t_{k+1}, t_k) - \tilde{K}(t_{k+1}, t_k) H(t_k).$$

Здесь матрицы

$$\{\Phi(t_{k+1}, \tau), \tau \in [t_k, t_{k+1}]\} \text{ и } \left\{ \frac{\partial \Phi(t_{k+1}, \tau)}{\partial \theta_i}, i=1, 2, \dots, s, \tau \in [t_k, t_{k+1}] \right\}$$

находятся из решения следующих систем уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\Phi(t_{k+1}, \tau)}{d\tau} = -\Phi(t_{k+1}, \tau) F(\tau), \tau \in [t_k, t_{k+1}]; \\ \Phi(t_{k+1}, t_{k+1}) = I, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{d}{d\tau} \left(\frac{\partial \Phi(t_{k+1}, \tau)}{\partial \theta_i} \right) = -\frac{\partial \Phi(t_{k+1}, \tau)}{\partial \theta_i} F(\tau) - \Phi(t_{k+1}, \tau) \frac{\partial F(\tau)}{\partial \theta_i}, \tau \in [t_k, t_{k+1}]; \\ \frac{\partial \Phi(t_{k+1}, t_{k+1})}{\partial \theta_i} = O. \end{cases}$$

Матрицы $K(t_{k+1})$ и $B(t_{k+1})$ определяются по следующим рекуррентным уравнениям непрерывно-дискретного фильтра Калмана:

$$K(t_{k+1}) = P(t_{k+1} | t_k) H^T(t_{k+1}) B^{-1}(t_{k+1});$$

$$B(t_{k+1}) = H(t_{k+1})P(t_{k+1}|t_k)H^T(t_{k+1}) + R;$$

$$\frac{d}{dt}P(t|t_k) = F(t)P(t|t_k) + P(t|t_k)F^T(t) + \Gamma(t)Q\Gamma^T(t), \quad t_k \leq t \leq t_{k+1};$$

$$P(t_{k+1}|t_{k+1}) = [I - K(t_{k+1})H(t_{k+1})]P(t_{k+1}|t_k).$$

В силу того, что неизвестные параметры в матрицу $H(t_{k+1})$ не входят, то выражение для $W_{ij}(U, \bar{x}(t_0); \Theta)$ также приводится к виду (12).

Далее покажем, что $W_{ij}(U, \bar{x}(t_0); \Theta) = O$.

Поскольку параметры не входят также в матрицы $F(t)$ (и, как следствие, в $\Phi(t_{k+1}, t_k)$), $\Psi(t)$ и вектор $\bar{x}(t_0)$, то, в соответствии с (17)–(19) можем записать

$$\bar{x}_A(t_{k+1}) = \begin{cases} \Phi_A(t_{k+1}, t_k)\bar{x}_A(t_k) + a_A(t_{k+1}, t_k)u(t_k), & k = 1, 2, \dots, N-1; \\ \left[\begin{array}{c} \Phi(t_1, t_0)\bar{x}(t_0) + \int_{t_0}^{t_1} \Phi(t_1, \tau)\Psi(\tau)u(\tau)d\tau \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{array} \right], & k = 0; \end{cases} \quad (20)$$

$$\Phi_A(t_{k+1}, t_k) = \begin{bmatrix} \Phi(t_{k+1}, t_k) & O & \dots & O \\ O & \Phi_A(t_{k+1}, t_k) & \dots & O \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ O & O & \dots & \Phi_A(t_{k+1}, t_k) \end{bmatrix}; \quad (21)$$

$$a_A(t_{k+1}, t_k) = \begin{bmatrix} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \Phi(t_{k+1}, \tau)\Psi(\tau)u(\tau)d\tau \\ O \\ \dots \\ O \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Воспользовавшись методом математической индукции, установим справедливость представления (16).

Пусть в выражении (20) $k = 0$, тогда

$$\bar{x}_A(t_1) = \begin{bmatrix} \Phi(t_1, t_0)\bar{x}(t_0) + \int_{t_0}^{t_1} \Phi(t_1, \tau)\Psi(\tau)u(\tau)d\tau \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}(t_1) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Далее будем считать, что для $k = n - 1$ верно

$$\bar{x}_A(t_n) = \begin{bmatrix} \bar{x}(t_n) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Тогда для $k = n$ из выражений (20)–(22) имеем

$$\begin{aligned} \bar{x}_A(t_{n+1}) &= \Phi_A(t_{n+1}, t_n)\bar{x}_A(t_n) + a_A(t_{n+1}, t_n)u(t_n) = \\ &= \begin{bmatrix} \Phi(t_{n+1}, t_n)\bar{x}(t_n) + \int_{t_n}^{t_{n+1}} \Phi(t_{n+1}, \tau)\Psi(\tau)u(\tau)d\tau \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}(t_{n+1}) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Повторяя вышеприведенные рассуждения для моделей дискретных систем, приходим к тому, что и в непрерывно-дискретном случае $W_{ij}(U, \bar{x}(t_0); \Theta) = 0$ и $M_{ij}(U, \bar{x}(t_0); \Theta) = V_{ij}(\Theta)$, $\forall i, j = 1, 2, \dots, s$, т. е. ИМФ не зависит от входного сигнала и вектора начальных условий при вхождении неизвестных параметров в матрицы Q, R и $P(t_0)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что в задачах планирования эксперимента для дискретных и непрерывно-дискретных систем, описываемых гауссовскими линейными моделями в пространстве состояний, информационная матрица Фишера остается постоянной при вхождении неизвестных параметров в ковариационные матрицы шумов системы, измерения и вектора начальных условий. В этом случае планирование входного сигнала и вектора начальных условий не способствует повышению качества параметрического оценивания и нецелесообразно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mehra R.K.* Optimal input signals for parameter estimation in dynamic systems: survey and new results // *IEEE Transaction on Automatic Control*. – 1974. – Vol. 19, iss. 6. – P. 753–768. – doi: 10.1109/TAC.1974.1100701.
2. *Morelli E.A.* Flight test of optimal inputs and comparison with conventional inputs // *Journal of Aircraft*. – 1999. – Vol. 36, N 2. – P. 389–397. – doi: 10.2514/2.2469.
3. *Овчаренко В.Н.* Планирование гармонических входных сигналов в задаче идентификации динамических систем // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. – 2001. – № 5. – С. 39–45.
4. *Jansson H.* Experiment design with application in identification for control. – Stockholm: KTH, 2004. – 207 p.
5. *Денисов В.И., Чубич В.М., Черникова О.С.* Активная параметрическая идентификация стохастических линейных дискретных систем в частотной области // *Сибирский журнал индустриальной математики*. – 2007. – Т. 10, № 1 (29). – С. 71–89.
6. Optimal input design for aircraft parameter estimation / C. Jauberthie, F. Bournonville, P. Cotton, F. Rendell // *Aerospace Science and Technology*. – 2006. – Vol. 10, iss. 4. – P. 331–337. – doi: 10.1016/j.ast.2005.08.002.
7. *Чубич В.М., Филиппова Е.В.* Применение методов теории планирования экспериментов при параметрической идентификации стохастических нелинейных непрерывно-дискретных систем // *Материалы X Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения»: АПЭП–2010, 22–24 сентября 2010 г.: в 7 т.* – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – Т. 6. – С. 85–93.
8. *Pronzato L.* Optimal experimental design and some related control problems // *Automatica*. – 2008. – Vol. 44, iss. 2. – P. 303–325. – doi: 10.1016/j.automatica.2007.05.016.
9. *Childers A.F.* Parameter identification and the design of experiments for continuous nonlinear dynamic systems: dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Mathematics. – Blacksburg, Virginia, 2009. – 106 p.
10. *Чубич В.М.* Информационная технология активной параметрической идентификации стохастических квазилинейных дискретных систем // *Информатика и ее применения*. – 2011. – Т. 5, вып. 1. – С. 46–57.
11. *Lu L., Yao B.* Experimental design for identification of nonlinear systems with bounded uncertainties // *2010 American Control Conference, 30 June 2010 – 2 July 2010*. – Baltimore, Maryland: IEEE, 2010. – P. 4504–4509. – doi: 10.1109/ACC.2010.5530951.
12. *Воевода А.А., Трошина Г.В.* Активная идентификация линейных стационарных динамических объектов на основе информационной матрицы Фишера: установившийся режим // *Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2014): материалы XII международной конференции, 2–4 октября 2014 г.: в 7 т.* – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 7. – С. 13–16.
13. *Pao C.P.* Линейные статистические методы и их применения / пер. с англ. А.М. Кагана [и др.]. – М.: Наука, 1968. – 548 с.
14. *Боровков А.А.* Математическая статистика. – Новосибирск: Наука, 1997. – 772 с.
15. *Ивченко Г.И., Медведев Ю.И.* Введение в математическую статистику. – М.: ЛКИ, 2010. – 600 с.
16. *Чубич В.М.* Вычисление информационной матрицы Фишера в задаче активной параметрической идентификации стохастических нелинейных дискретных систем // *Научный вестник НГТУ*. – 2009. – № 1 (34). – С. 23–40.
17. *Чубич В.М., Филиппова Е.В.* Вычисление производных информационной матрицы Фишера по компонентам входного сигнала в задаче активной параметрической идентификации стохастических нелинейных непрерывно-дискретных систем // *Научный вестник НГТУ*. – 2010. – № 2 (39). – С. 53–63.
18. *Чубич В.М.* Особенности вычисления информационной матрицы Фишера в задаче активной параметрической идентификации стохастических нелинейных непрерывно-дискретных систем // *Научный вестник НГТУ*. – 2009. – № 1 (34). – С. 41–54.

Чубич Владимир Михайлович, доктор технических наук, заведующий кафедрой теоретической и прикладной информатики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – анализ и планирование экспериментов для стохастических динамических систем. Является автором и соавтором более 50 публикаций, в том числе пяти учебных пособий и одной монографии. E-mail: chubich@ami.nstu.ru.

Черникова Оксана Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной информатики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – планирование экспериментов для стохастических динамических систем. Является автором и соавтором более 25 публикаций, в том числе одной монографии. E-mail: chernikova@corp.nstu.ru .

Peculiarities of the experiment design problem for Gaussian linear systems*

V.M. CHUBICH¹, O.S. CHERNIKOVA²

¹ Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc, head, department of theoretical and applied informatics. E-mail: chubich@ami.nstu.ru

² Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: chernikova@corp.nstu.ru

Procedures for active parametric identification are a combination of traditional methods of parametric estimation and experiment design methods. Given a certain structure of the mathematical model active parametric identification involves the following stages: the calculation of the unknown parameter estimates based on measurement data corresponding to an experiment plan based on the estimates of an optimal experiment and conversion of parameter estimates based on measurement data corresponding to an optimal plan. The application of ideas and methods of the modern theory of experiment design in the construction of mathematical models of stochastic dynamical systems enhances the efficiency and quality of the research conducted. The calculation of the Fisher information matrix takes a central place in the procedures of active parametric identification. The Fisher information matrix appears in the relevant optimality criteria of the plan. This work provides a theoretical analysis of the Fisher information matrix expression for Gaussian models of linear discrete and continuous-discrete systems. It is stated that with certain parameterizations of model structures the Fisher information matrix remains constant and the unknown parameters in various combinations are included in the covariance matrix of a system noise, noise measurements and the vector of initial conditions. Thus, being constant the Fisher information matrix does not depend on the input signal and the mathematical expectation of the vector of initial conditions. The authors come to a practical conclusion about parameterizations of discrete models and continuous-discrete systems in which the scheduling of input signals and initial conditions does not allow improving the quality of parametric estimation. In this case, the use of active parametric identification procedure does not provide a positive effect compared to the conventional estimation of the unknown parameters.

Keywords: discrete system, continuous-discrete system, process noise, measurement noise, unknown parameters, Fisher information matrix, experiment design, Kalman filter

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-178-191

REFERENCES

1. Mehra R.K. Optimal input signals for parameter estimation in dynamic systems: survey and new results. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 1974, vol. 19, iss. 6, pp. 753–768. doi: 10.1109/TAC.1974.1100701
2. Morelli E.A. Flight test of optimal inputs and comparison with conventional inputs. *Journal of Aircraft*, 1999, vol. 36, no. 2, pp. 389–397. doi: 10.2514/2.2469
3. Ovcharenko V.N. Planirovanie garmonicheskikh vhodnyh signalov v zadache identifikacii dinamicheskikh sistem [Planning of harmonie input signals in the problem of dynamic system identification]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya – Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2001, no. 5, pp. 39–45. (In Russian)

* Received 1 June 2015.

The work was supported by the Ministry of education and science of the Russian Federation (№2014/138, project № 1689).

4. Jansson H. *Experiment design with application in identification for control*. Stockholm, KTH, 2004. 207 p.
5. Denisov V.I., Chubich V.M., Chernikova O.S. Aktivnaya parametricheskaya identifikatsiya stokhasticheskikh lineinykh diskretnykh sistem v chastotnoi oblasti [Active parametric identification of stochastic linear discrete systems in a frequency domain]. *Sibirskij zhurnal industrial'noj matematiki – Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 2007, vol. 10, no. 1 (29), pp. 71–89. (In Russian)
6. Jauberthie C., Bournonville F., Cotton P., Rendell F. Optimal input design for aircraft parameter estimation. *Aerospace Science and Technology*, 2006, vol. 10, iss. 4, pp. 331–337. doi: 10.1016/j.ast.2005.08.002
7. Chubich V.M., Filippova E.V. [Application of the theory of design of experiments with parametric identification of stochastic nonlinear continuous-discrete systems]. *Materialy X Mezhdunarodnoi konferentsii Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya, APEP–2010*. V 7 t. [Proceedings of 10th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE–2010). In 7 vol.], Novosibirsk, 22–24 September 2010, vol. 6, pp. 85–93. (In Russian)
8. Pronzato L. Optimal experimental design and some related control problems. *Automatica*, 2008, vol. 44, iss. 2, pp. 303–325. doi: 10.1016/j.automatica.2007.05.016
9. Childers A.F. *Parameter identification and the design of experiments for continuous nonlinear dynamic systems*. Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Mathematics. Blacksburg, Virginia, 2009. 106 p.
10. Chubich V.M. Informatsionnaya tekhnologiya aktivnoi parametricheskoi identifikatsii stokhasticheskikh kvazilineinykh diskretnykh sistem [Information technology of active parametric identification of stochastic quasi-linear discrete systems]. *Informatika i ee primeneniya – Informatics and Applications*, 2011, vol. 5, iss. 1, pp. 46–57.
11. Lu L., Yao B. Experimental design for identification of nonlinear systems with bounded uncertainties. *2010 American Control Conference*, Baltimore, Maryland, 30 June 2010 – 2 July 2010, 2010, pp. 4504–4509. doi: 10.1109/ACC.2010.5530951
12. Voevoda A.A., Troshina G.V. [Active identification of liner stationary dynamic objects on base of the Fisher information matrix: the steady state] *Trudy XII mezhdunarodnoi konferentsii “Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya”, APEP–2014*: v 7 t. [12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE–2014: Proceedings: in 7 vol.], Novosibirsk, Russia, 2–4 October 2014, vol. 1, pp. 745–748. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040785
13. Rao C.R. *Linear statistical inference and its applications*. New York, John Wiley and Sons, 1965. xviii, 522 p. (Russ. ed.: Rao S.R. *Lineinye statisticheskie metody i ikh primeneniya*. Translated from English A.M. Kagan et al. Moscow, Nauka Publ., 1968. 548 p.).
14. Borovkov A.A. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Novosibirsk, Nauka Publ., Siberian Branch, 1997. 772 p.
15. Ivchenko G.I., Medvedev Yu.I. *Vvedenie v matematicheskuyu statistiku* [Introduction to mathematical statistics]. Moscow, LKI Publ., 2010. 600 p.
16. Chubich V.M. Vychislenie informatsionnoi matritsy Fishera v zadache aktivnoi parametricheskoi identifikatsii stokhasticheskikh nelineinykh diskretnykh sistem [The calculation of the Fisher information matrix in the problem of active parametric identification for stochastic nonlinear discrete systems]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2009, no. 1 (34), pp. 23–40.
17. Chubich V.M., Filippova E.V. Vychislenie proizvodnykh informatsionnoi matritsy Fishera po komponentam vkhodnogo signala v zadache aktivnoi parametricheskoi identifikatsii stokhasticheskikh nelineinykh nepreryvno-diskretnykh sistem [The computation of the derivatives of the Fisher information matrix with respect to the components of input signal in the problem of active parametric identification of stochastic nonlinear continuous-discrete systems]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 2 (39), pp. 53–63.
18. Chubich V.M. Osobennosti vychislenie informatsionnoi matritsy Fishera v zadache aktivnoi parametricheskoi identifikatsii stokhasticheskikh nelineinykh nepreryvno-diskretnykh sistem [Particulars of the calculation of the Fisher information matrix in the problem of active parametric identification for stochastic nonlinear continuous-discrete systems]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2009, no. 1 (34), pp. 41–54.

УДК 546.261

Синтез высокодисперсного порошка карбида циркония с использованием нановолокнистого углерода*

Ю.Л. КРУТСКИЙ¹, К.Д. ДЮКОВА², А.Г. БАННОВ³,
Е.А. МАКСИМОВСКИЙ^{4,5}, А.В. УХИНА⁶, Т.М. КРУТСКАЯ⁷,
О.В. НЕЦКИНА⁸, В.В. КУЗНЕЦОВА⁹

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: j_krutskii@rambler.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант. E-mail: dyukova_kx701@mail.ru

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: bannov_a@mail.ru

⁴ 630090, РФ, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 3, Институт неорганической химии СО РАН, кандидат химических наук, старший научный сотрудник. E-mail: eugene@niic.nsc.ru

⁵ 630090, РФ, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Новосибирский государственный университет, кандидат химических наук, старший научный сотрудник. E-mail: eugene@niic.nsc.ru

⁶ 630128, РФ, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18, Институт химии твердого тела и механохимии, инженер. E-mail: a.ukhina@ngs.ru

⁷ 630008, РФ, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, кандидат химических наук, доцент. E-mail: t.krutskaya@mail.ru

⁸ 630090, РФ, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 5, Институт катализа СО РАН, кандидат химических наук, научный сотрудник. E-mail: netskina@catalysis.ru

⁹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент. E-mail: ky_vaf@mail.ru

В статье представлены результаты исследования процесса синтеза высокодисперсного порошка карбида циркония и изучения некоторых его характеристик и свойств. Карбид циркония был получен восстановлением диоксида циркония нановолокнистым углеродом в печи сопротивления с графитовым нагревателем. Наличие в образцах карбида циркония установлено рентгенофазовым анализом. Содержание циркония и примесей найдено рентгеноспектральным флуоресцентным методом, общего углерода – сжиганием образца в токе кислорода с последующим определением CO₂. Морфология и размер частиц определены методом растровой электронной микроскопии с применением локального энергодисперсионного рентгеновского микроанализа, позволившего определить в них наличие преимущественно циркония и углерода.

* Статья получена 3 июля 2015 г.

да. Удельная поверхность, объем и диаметр пор определены методом БЭТ. Найдена плотность образцов. Выполнен седиментационный анализ. Термоокислительная стабильность в кислороде при нагреве до температуры до 1100 °С изучена синхронным термическим анализом. Изучена стойкость полученного карбида в серной кислоте. Оптимальными параметрами синтеза карбида циркония являются выдержка в течение 60 минут при температурах 2000...2100 °С. Полученный материал представлен одной фазой – карбидом циркония с содержанием примесей на уровне 3 %. Он состоит из сросшихся частиц размером до 20 мкм. Удельная поверхность материала составляет 1,3...1,8 м²/г. Начало окисления карбида циркония происходит при ~ 480 °С, процесс завершается при ~ 800 °С. При выдержке в растворе серной кислоты при комнатной температуре разложения карбида практически не происходит. Таким образом, по коррозионной стойкости полученный материал сопоставим с крупнозернистым (размер частиц 40...50 мкм) порошком аналогичного соединения.

Ключевые слова: высокодисперсный порошок, карбид циркония, карботермическое восстановление, характеристики, свойства, морфология, дисперсность, нановолокнистый углерод

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-192-205

ВВЕДЕНИЕ

В системе цирконий-углерод существует одно соединение – карбид циркония $ZrC_{(1-x)}$ с широкой областью гомогенности (35...50 % ат. С при 1400 °С) [1]. Наиболее часто применяется карбид циркония состава, близкого к ZrC [2]. Такой карбид вследствие высоких значений твердости (~25 ГПа), температуры плавления (~3530 °С), значительной коррозионной стойкости и износостойчивости используется в современной технике в качестве абразивного материала, при изготовлении режущего инструмента, огнеупорных изделий и защитных покрытий [2–4].

Получение карбида циркония состава ZrC возможно синтезом из элементов при выдержке шихты в течение часа при 1800 °С в условиях глубокого вакуума (0,02 Па) [5]. Синтез карбида циркония из смеси порошков циркония и углерода с добавками металлов-разбавителей (алюминия, меди, железа) изучен в работах [6–9]. При их отсутствии в шихте образуется практически чистый карбид циркония с размером частиц от 4 до 10 мкм. Широкое применение такого метода сдерживается сравнительно высокой стоимостью порошкообразного циркония.

Магнийтермический процесс синтеза карбида циркония описан в работах [10–12]. В [10, 11] исходными реагентами служили порошки оксида циркония, магнезия и углерода (сажи). Процесс проводился в среде аргона при высоком давлении – для подавления испарения магнезия. Размер частиц карбида циркония составлял 0,3...0,5 мкм. В исследовании [12] синтез из оксида циркония, магнезия и карбоната лития осуществлен в автоклаве при температуре 600 °С. Размер частиц карбида циркония составлял около 30 нм. Стойкость его к окислению невелика: оно начинается при ~ 300 °С и полностью завершается при ~ 600 °С. Особенностью магнийтермических процессов является необходимость кислотной обработки продуктов реакции для удаления оксида магнезия.

Исследованию карботермического процесса посвящено большое количество работ. Считается, что для термодинамически стабильных оксидов, к которым относится диоксид циркония, восстановителем является углерод [13]. Эта точка зрения подтверждена в ряде более поздних публикаций [14–16], в

которых сообщается об отсутствии диоксида углерода в газовой фазе при температурах синтеза карбида циркония (1700...2000 °С). Мнение авторов работы [17] о восстановлении диоксида циркония монооксидом углерода не подтверждено надежными экспериментальными данными.

В работе [18] шихту из оксида циркония и сажи перемешивали в шаровой мельнице в течение восьми часов, после чего ее нагревали в печи сопротивления. Оптимальными параметрами процесса являются стехиометрическое соотношение реагентов (на карбид состава ZrC) и время выдержки один час в среде водорода при 2200 °С. В работе [19] карбид циркония был получен термообработкой при 1400 °С в течение двух часов в условиях вакуума. Шихты из порошков оксида циркония и графита предварительно подвергались механической активации. При последующем измельчении конгломератов карбида циркония был получен нанопорошок со средним размером частиц 170 нм.

В ряде работ [20–29] карботермический синтез выполнен способом золь-гель. Общей особенностью этого способа является проведение синтеза из ультрадисперсных шихт (обеспечивающих тесный контакт реагентов), что позволяет снизить температуру восстановления и получать наноразмерные порошки. Однако такие процессы сложны и многостадийны. Полученные нанопорошки, как правило, имеют повышенное содержание кислорода (от 3 до 8 % масс. [21]), поэтому фактически являются оксикарбидами. Следует отметить, что карбид циркония и его оксикарбиды имеют одинаковую кристаллическую решетку с практически теми же параметрами, поэтому идентифицировать последние рентгенофазовым анализом не представляется возможным [26].

Синтез нанопорошка (средний размер частиц 50 нм) карбонитрида циркония $ZrC_{0,90}N_{0,06}$, содержащего примесь диоксида циркония в количестве 12...16 % масс., осуществлен в потоке азотоводородной плазмы. В отходящих газах содержится токсичный цианистый водород [30].

Анализ литературных данных показывает, что получение карбида циркония в виде порошка с незначительным содержанием примесей целесообразно осуществлять сравнительно несложным печным синтезом путем карботермического восстановления оксида циркония, причем в качестве углеродного материала чаще всего используется ламповая сажа со сравнительно невысоким значением удельной поверхности ($\sim 50 \text{ м}^2/\text{г}$) [18].

Резюмируя вышеизложенное, стоит отметить, что сведения о влиянии вида углеродного материала на параметры синтеза, и в особенности на характеристики карбида циркония, в литературе ограничены. В частности, полностью отсутствует информация об использовании в качестве такого материала нановолокнистого углерода (НВУ) [31, 32]. В то же время установлено, что НВУ является эффективным реагентом для карботермического синтеза высокодисперсных порошков карбидов титана и хрома [33, 34].

Целью настоящей работы явилось исследование влияния температуры процесса синтеза карбида циркония карботермическим методом с использованием в качестве восстановителя и карбидообразующего материала НВУ на характеристики и свойства продуктов реакции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве восстановителя и карбидообразующего агента использовался гранулированный НВУ. Размер гранул варьировался в диапазоне 4...8 мм. Гранулы НВУ образованы плотно переплетенными волокнами с диаметром 30...100 нм. Гранулы сравнительно легко растираются в порошок. НВУ достаточно чист: находящиеся в нем примеси представляют собой остатки исходного катализатора (90 % Ni / 10 % Al₂O₃); их содержание не превышает 1 %. Величина его удельной поверхности находится в пределах 140...160 м²/г, т. е. существенно выше, чем у ламповой сажи.

Для приготовления шихт использовались оксид циркония (ТУ 6-09-2483-57) и НВУ (измельченный и протертый через сито – 100 мкм). Исходные порошки совместно протирались через сито с размером ячейки 100 мкм.

Для получения карбида состава ZrC шихта готовилась по стехиометрии для реакции



Термодинамическая температура начала восстановления (при давлении монооксида углерода 0,1 МПа), рассчитанная по справочным данным [1, 35], для реакции (1) составляет примерно 1670 °С. С учетом возможных кинетических затруднений эксперименты были проведены при температурах, °С: 2000, 2100, 2200 и 2300 (образцы № 1–4 соответственно) в печи сопротивления с графитовым нагревателем. Шихта массой 50...60 г помещалась в графитовые тигли, так как они совместно с нагревателем создают в печном пространстве при температурах синтеза восстановительную атмосферу из азота и монооксида углерода. Время процесса во всех случаях составляло 60 минут. Оценка степени прохождения реакции проводилась путем взвешивания шихты и продуктов реакции и сопоставления экспериментальных данных с расчетными. Полученные материалы идентифицировались рентгенофазовым анализом на дифрактометре ДРОН-3 с использованием Cu K α -излучения ($\lambda = 0,15406$ нм). Определение содержания циркония и примесей элементов с атомной массой больше, чем у фтора, в полученных образцах выполнялось рентгеноспектральным флуоресцентным методом на анализаторе VRA-30 с Rh-анодом рентгеновской трубки. Определение содержания общего углерода выполнялось по CO₂ сжиганием навески в токе кислорода на анализаторе CS-444 фирмы LECO. Измерение пикнометрической плотности образцов выполнялось на автоматическом газовом пикнометре Ultrapycnometer 1200 e. Морфология поверхности и элементный состав образцов изучались на растворяемом электронном микроскопе (РЭМ) S-3400N Hitachi с приставкой для энергодисперсионного микроанализа производства фирмы Oxford Instruments. Микрофотографии поверхности образцов были получены в режиме низкого вакуума детектором обратнорассеянных электронов. Определение текстурных характеристик образцов проводилось по изотермам низкотемпературной адсорбции и десорбции азота при 77 К, полученных на приборе Quantachrom NOVA 2200e в диапазоне относительных давлений от 0,005 до 0,995. Удельная поверхность рассчитывалась по многоточечному методу БЭТ. Седиментационный анализ выполнен на лазерном анализаторе частиц ВА «Инструментс MicroSizer 201». Термоокислительная стабильность образцов

определялась с использованием прибора синхронного термического анализа NETZSCH STA 449 *Jupiter*. В ходе анализа проводили окисление образцов в атмосфере кислорода при нагревании до температуры 1100 °С со скоростью 15 К/мин и выдерживании при этой температуре в течение трех часов для полноты протекания реакции окисления. Изучена также стойкость образцов в серной кислоте.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчетная убыль массы при протекании реакции (1) составляет 35,22 %. По результатам экспериментов для образцов № 1–3 убыль массы составила, %: 33,9; 34,5; 34,4. Образец № 4 был получен в спеченном состоянии и не изучался. Дифрактограммы образцов № 1–4 практически идентичны. На рис. 1 приведена дифрактограмма образца № 1. На ней присутствуют рефлексы, соответствующие только карбиду ZrC.

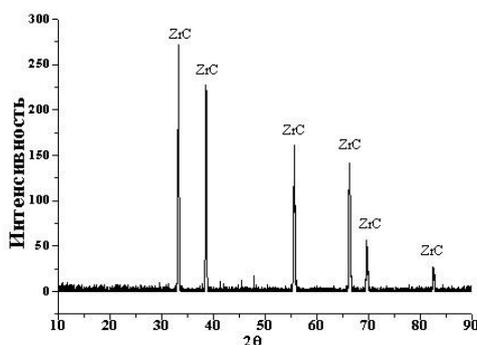


Рис. 1. Дифрактограмма образца № 1

Результаты элементного анализа образцов приведены в табл. 1.

Расчетное содержание циркония в карбиде циркония составляет 88,35 %, а углерода 11,65 %. Полученные данные по этим элементам близки к расчетным. Содержание гафния (элемента – «спутника» циркония) сравнительно велико, однако рентгенофазовым анализом наличие карбида гафния в образцах не зафиксировано. Остальные примеси находятся на следовом уровне (табл. 1).

Таблица 1

Результаты элементного анализа образцов карбида циркония

Образец	Содержание, % масс.			
	Zr	C _{общ}	Примеси	
			Hf	Σ (Cr, Ni, Fe, Ti)
№ 1	87,87	11,7	2,12	0,05
№ 2	87,64	11,8	2,81	0,06
№ 3	87,78	11,7	2,27	0,07
№ 4	89,95	11,8	2,32	0,05

Плотность образцов карбидов составляет, г/см³: № 1 – 6,29; № 2 – 6,41; № 3 – 6,25; № 4 – 6,44. Эти значения достаточно близки к приведенному в справочной литературе для карбида циркония (6,73 г/см³) [1].

Анализ снимков растровой электронной микроскопии показал, что форма и размер частиц от температуры синтеза практически не зависят. Типичные фотографии (образцы № 1 и 4) приведены на рис. 2.

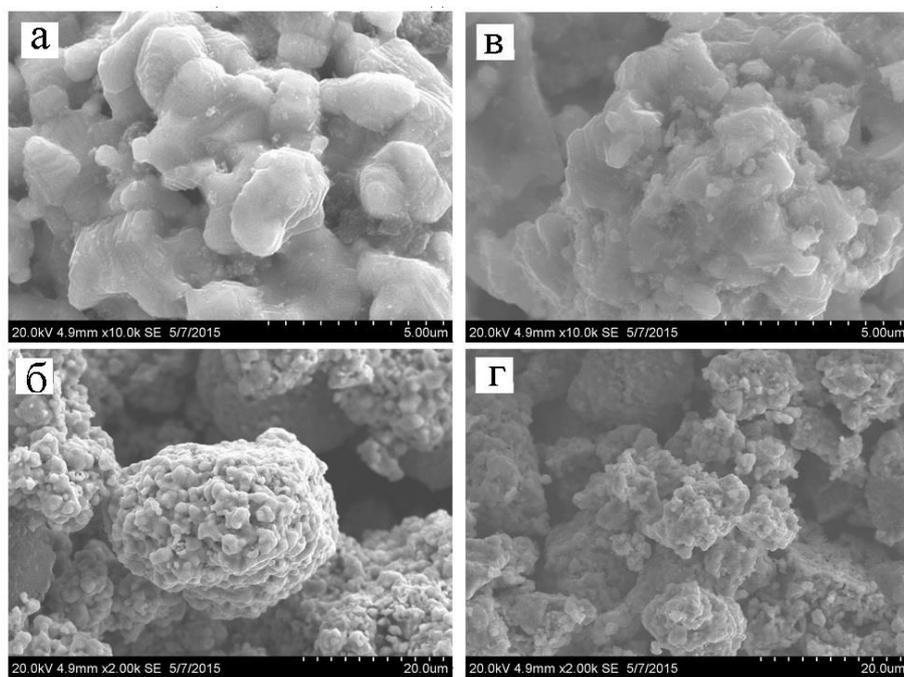


Рис. 2. Снимки растровой электронной микроскопии образцов № 1 (а, б) и № 4 (в, з)

На плоскостях частиц видны (фотографии с масштабом 5 мкм) «ступеньки» – явное свидетельство послойного роста кристаллов. Частицы агрегированы, размер агрегатов достигает 20 мкм (фотографии с масштабом 20 мкм). По результатам энергодисперсионной спектроскопии (EDAX) в образцах карбидов присутствуют в основном цирконий и углерод и в незначительных количествах кислород.

Результаты седиментационного анализа приведены на рис. 3 (типичная гистограмма, на примере образца № 1). Эти данные в основном повторяют результаты растровой электронной микроскопии о том, что частицы карбида образуют агрегаты размером до 20 мкм. Средний размер агрегированных частиц находится в диапазоне от 13 мкм (2000 °С) до 15 мкм (2300 °С). Средний размер с увеличением температуры незначительно возрастает. Таким образом, по совокупности этих трех методов исследований можно сделать вывод, что температура синтеза очень мало влияет на размеры частиц.

Результаты исследования текстурных характеристик образцов карбида циркония приведены в табл. 2. С увеличением температуры синтеза удельная поверхность образцов незначительно снижается.

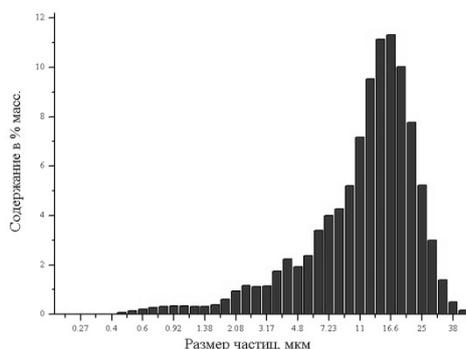


Рис. 3. Гистограмма образца № 1

Таблица 2

Некоторые текстурные характеристики карбида циркония

Образец	Удельная поверхность, м ² /г	Удельный объем пор, см ³ /г	Средний диаметр пор, нм
№ 1	1,8	0,009	13
№ 2	1,7	0,005	13
№ 3	1,5	0,006	12
№ 4	1,3	0,005	13

Тугоплавкие соединения и изделия из них обычно эксплуатируются в экстремальных условиях, в том числе в агрессивных средах. Поэтому стойкость их к действию кислорода при высоких температурах является важным свойством. При окислении карбида циркония с позиции термодинамики наиболее вероятно протекание следующей реакции:



При этом расчетный прирост массы составляет 19,42 %. Дериватограмма образца № 1 приведена на рис. 4.

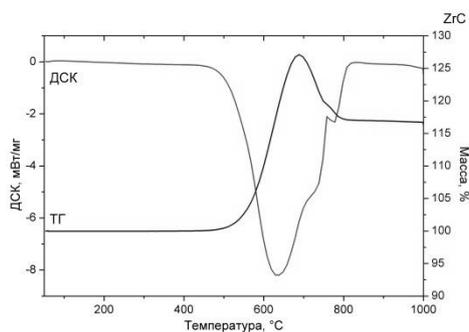


Рис. 4. ТГ-ДСК кривые образца № 1

Начало окисления карбида циркония происходит при ~ 480 °С. Сложный характер линии изменения массы можно объяснить следующим. Вероятно, на

начальном этапе имеет место неполное окисление карбида циркония за счет растворения в нем кислорода [36] с образованием оксикарбида ZrC_xO_y переменного состава. В дальнейшем оксикарбид постепенно переходит в оксид с выделением оксидов углерода в газовую фазу, и этот процесс завершается при ~ 800 °С. Окисление карбида циркония в этом интервале температур происходит почти полностью, поскольку экспериментальные данные по убыли массы (~ 17 %) практически совпадают с расчетными. Порошок карбида циркония состава $ZrC_{0,96}$ с размером частиц $40 \dots 50$ мкм окисляется примерно в таком же температурном диапазоне ($320 \dots 1100$ °С) [37]. Максимальное тепловыделение при окислении карбида циркония происходит при 650 °С. При температуре ~ 500 °С на линии ТГ не наблюдается убыли массы, сопровождаемой экзотермическим эффектом, что служит свидетельством отсутствия примеси свободного углерода.

Исследования по стойкости в серной кислоте для сопоставления проводили аналогично экспериментам, описанным в [38]. Навеску порошка массой $0,2$ г помещали в химический стакан, заливали 50 мл раствора серной кислоты концентрации (1:4) и выдерживали при комнатной температуре в течение 24 часов. По истечении заданного времени отфильтровывали нерастворившийся остаток через бумажный фильтр (синяя лента), промывали дистиллированной водой до исчезновения в промывных водах кислой реакции, остаток высушивали при 80 °С и взвешивали. Количество нерастворимого остатка для всех образцов составляло $98,65 \dots 98,80$ % масс. Это свидетельствует о высокой коррозионной стойкости синтезированных образцов карбида циркония в кислой среде, сопоставимой со стойкостью крупнозернистых порошков этого соединения.

ВЫВОДЫ

В данной работе проведено исследование процесса синтеза высокодисперсного порошка карбида циркония карботермическим восстановлением диоксида циркония с использованием нановолокнистого углерода (НВУ). Синтез проводился в печи сопротивления с графитовым нагревателем. Оптимальные параметры процесса: массовое соотношение оксид циркония : углерод по стехиометрии на получение карбида циркония состава ZrC , время выдержки при температуре $2000 \dots 2100$ °С 60 минут. Полученные продукты однофазны и содержат только карбид циркония с незначительным количеством примесей (не более 3 %). Значения пикнометрической плотности синтезированных карбидов практически соответствуют приведенным в справочной литературе. По результатам растровой электронной микроскопии установлено, что агрегаты из частиц карбида циркония не превышают 20 мкм. Это подтверждается данными седиментационного анализа. По изотермам низкотемпературной адсорбции и десорбции азота определены: удельная поверхность порошков ($1,3 \dots 1,8$ м²/г), удельный объем пор ($0,005 \dots 0,009$ см³/г) и средний диаметр пор ($12 \dots 13$ нм). Установлено, что температура синтеза незначительно влияет на размер частиц и удельную поверхность образцов. Окисление синтезированного карбида циркония происходит в диапазоне температур $480 \dots 800$ °С. В растворах серной кислоты полученные порошки карбида циркония практически не разлагаются. По этим свойствам высокодисперсные

порошки карбида циркония сопоставимы с крупнозернистыми порошками аналогичного соединения. В работе показано, что НВУ может быть эффективно использован для синтеза карбида циркония.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений: справочник / под ред. Т.Я. Косолаповой. – М.: Металлургия, 1986. – 928 с.
2. *Адамовский А.А.* Карбиды переходных металлов в процессах абразивной обработки // Порошковая металлургия. – 2007. – № 11/12. – С. 96–111.
3. Microstructure and ablation resistance of ZrC nanostructured coating for carbon/carbon composites / S.-L. Wang, K.-Z. Li, H.-J. Li, Y.-L. Zhang // *Materials Letters*. – 2013. – Vol. 107. – P. 99–102. – doi: 10.1016/j.matlet.2013.05.124.
4. In situ synthesis mechanism and characterization of ZrB₂-ZrC-SiC ultra high-temperature ceramics / Q. Qu, J. Han, W. Han, X. Zhang, C. Hong // *Materials Chemistry and Physics*. – 2008. – Vol. 110, iss. 2–3. – P. 216–221. – doi: 10.1016/j.matchemphys.2008.01.041.
5. *Науменко В.Я.* Получение карбидов переходных металлов IV-V групп в областях их гомогенности // Порошковая металлургия. – 1970. – № 10. – С. 20–22.
6. In situ synthesis of ZrC particles and its formation mechanism by self-propagating reaction from Al-Zr-C elemental powders / M.S. Song, B. Huang, M.X. Zhang, J.G. Li // *Powder Technology*. – 2009. – Vol. 191, iss. 1–2. – P. 34–38. – doi: 10.1016/j.powtec.2008.09.005.
7. Thermal explosion synthesis of ZrC particles and their mechanism of formation from Al-Zr-C elemental powders / Q. Hu, M. Zhang, P. Luo, M. Song, J. Li // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2012. – Vol. 35. – P. 251–256. – doi: 10.1016/j.ijrmhm.2012.06.008.
8. Study of formation behavior of ZrC in the Cu-Zr-C system during combustion synthesis / M.X. Zhang, B. Huang, Q.D. Hu, J.G. Li // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2012. – Vol. 31. – P. 230–235. – doi: 10.1016/j.ijrmhm.2011.11.008.
9. Study of formation behavior of ZrC in the Fe-Zr-C system during combustion synthesis / M.X. Zhang, Q.D. Hu, B. Huang, J.Z. Li, J.G. Li // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2011. – Vol. 29, iss. 5. – P. 596–600. – doi: 10.1016/j.ijrmhm.2011.04.002.
10. Preparation of ZrC by self-propagating high-temperature synthesis / J. Li, Z.Y. Fu, W.M. Wang, H. Wang, S.H. Lee, K. Niihara // *Ceramics International*. – 2010. – Vol. 36, iss. 5. – P. 1681–1686. – doi: 10.1016/j.ceramint.2010.03.013.
11. Simple synthesis of nano-sized refractory metal carbides by combustion process / H.I. Won, N. Hayk, C.W. Won, H.H. Lee // *Journal of Materials Science*. – 2011. – Vol. 46, iss. 18. – P. 6000–6006. – doi: 10.1007/s10853-011-5562-0.
12. Solid-state reaction synthesis of ZrC from zirconium oxide at low temperature / L. Wang, L. Si, Y. Zhu, Y. Qian // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2013. – Vol. 38. – P. 134–136. – doi: 10.1016/j.ijrmhm.2012.12.001.
13. Взаимодействие окислов металлов с углеродом / В.П. Елютин, Ю.А. Павлов, В.П. Поляков, С.Б. Шеболдаев. – М.: Металлургия, 1976. – 360 с.
14. Comparative microscale investigations of the carbothermal synthesis of (Ti, Zr, Si) carbides with oxide intermediates of different volatilities / S. Stolle, W. Gruner, W. Pitschke, L.-M. Berger, K. Wetzig // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2000. – Vol. 18, iss. 1. – P. 61–72. – doi: 10.1016/S0263-4368(00)00018-4.
15. *Gruner W., Stolle S., Wetzig K.* Formation of CO_x species during the carbothermal reduction of oxides of Zr, Si, Ti, Cr, W and Mo // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2000. – Vol. 18, iss. 2–3. – P. 137–145. – doi: 10.1016/S0263-4368(00)00013-5.
16. Theoretical and experimental investigations on the mechanism of carbothermal reduction of zirconia / A. Sondhi, C. Morandi, R.F. Reidy, T.W. Scharf // *Ceramics International*. – 2013. – Vol. 39, iss. 4. – P. 4489–4497. – doi: 10.1016/j.ceramint.2012.11.043.
17. *Водопьянов А.Г., Кожевников Г.Н., Баранов С.В.* Взаимодействие тугоплавких оксидов металлов с углеродом // *Успехи химии*. – 1988. – Т. 57, вып. 9. – С. 1419–1439.
18. *Шумилова Р.Г., Косолапова Т.Я.* Получение карбида циркония в полупромышленном масштабе // Порошковая металлургия. – 1968. – № 4 (64). – С. 86–89.
19. Preparation of highly dispersed ultra-fine ZrC by combination of carbothermal reduction of ball-milled ZrO₂ and C mixture and bead milling / M. Seo, S. Kang, Y. Kim, S.-S. Ryu // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2013. – Vol. 41. – P. 345–350. – doi: 10.1016/j.ijrmhm.2013.05.007.

20. Carbothermal reduction synthesis of nanocrystalline zirconium carbide and hafnium carbide powders using solution-derived precursors / M.D. Sacks, C.-A. Wang, Z. Yang, A. Jain // *Journal of Materials Science*. – 2004. – Vol. 39, iss. 19. – P. 6057–6066. – doi: 10.1023/B:JMSC.0000041702.76858.a7.

21. Carbothermal synthesis of ultra-fine zirconium carbide powders using inorganic precursors via sol-gel method / Y. Yan, Z. Huang, X. Liu, D. Jiang // *Journal of Sol-Gel Science Technology*. – 2007. – Vol. 44, iss. 1. – P. 81–85. – doi: 10.1007/s10971-007-1595-x.

22. Synthesis of nanosized zirconium carbide by a sol-gel route / M. Dolle, D. Gosset, C. Bogicevic, F. Karolak, D. Simeone, G. Baldinozzi // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2007. – Vol. 27, iss. 4. – P. 2061–2067. – doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.06.005.

23. One pot synthesis of soluble polymer for zirconium carbide / X.Y. Tao, W.F. Qiu, H. Li, T. Zhao // *Chinese Chemical Letters*. – 2010. – Vol. 21, iss. 5. – P. 620–623. – doi: 10.1016/j.cclet.2010.01.002.

24. A simple way to prepare precursors for zirconium carbide / D. Zhao, H. Hu, C. Zhang, Y. Zhang, J. Wang // *Journal of Materials Science*. – 2010. – Vol. 45, iss. 23. – P. 6401–6405. – doi: 10.1007/s10853-010-4722-y.

25. Carbothermal synthesis of submicrometer zirconium carbide from polyzirconoxane and phenolic resin by the facile one-pot reaction / C. Yan, R. Liu, Y. Cao, C. Zhang, D. Zhang // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2012. – Vol. 95, iss. 1. – P. 3366–3369. – doi: 10.1111/j.1551-2916.2012.05456.x.

26. Carbothermal synthesis of ZrC powders using a combustion synthesis precursor / A. Chu, M. Qin, Rafi-ud-din, L. Zhang, H. Lu, B. Jia, X. Qu // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2013. – Vol. 36. – P. 204–210. – doi: 10.1016/j.ijrmhm.2012.08.016.

27. Synthesis of zirconium carbide powders using chitosan as carbon source / C. Yan, R. Liu, Y. Cao, C. Zhang, D. Zhang // *Ceramics International*. – 2013. – Vol. 39, iss. 3. – P. 3409–3412. – doi: 10.1016/j.ceramint.2012.09.032.

28. Synthesis and evolution of zirconium carbide via sol-gel route: features of nanoparticle oxide-carbon reactions / C. Ang, T. Williams, A. Seeber, H. Wang, Y.-B. Cheng // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2013. – Vol. 96, iss. 4. – P. 1099–1106. – doi: 10.1111/jace.12260.

29. Synthesis of nanosized zirconium carbide powders by a combinational method of sol-gel and pulse current heating / J. Xie, Z. Fu, Y. Wang, S.W. Lee, K. Niihara // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2014. – Vol. 34, iss. 1. – P. 13.e1–13.e7. – doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.07.003.

30. Новые материалы и технологии. Экстремальные технологические процессы / отв. ред. М.Ф. Жуков, В.Е. Панин. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1992. – С. 40–63.

31. Mechanism of porous filamentous carbon granule formation on catalytic hydrocarbon decomposition / G.G. Kuvshinov, Yu.L. Mogilnykh, D.G. Kuvshinov, D.Yu. Yermakov, M.A. Yermakova, A.N. Salanov, N.A. Rudina // *Carbon*. – 1999. – Vol. 37, iss. 8. – P. 1239–1246. – doi: 10.1016/S0008-6223(98)00320-0.

32. Реализация процесса получения гранулированного каталитического волокнистого углерода в масштабе пилотного реактора / Г.Г. Кувшинов, С.Г. Заварухин, Ю.И. Могильных, Д.Г. Кувшинов // *Химическая промышленность*. – 1998. – Т. 75, № 5. – С. 300–307.

33. Синтез высокодисперсного порошка карбида титана с использованием нановолокнистого углерода / Ю.Л. Крутский, А.Г. Баннов, Е.В. Антонова, В.В. Шинкарев, Е.А. Максимовский, А.В. Ухина, Е.А. Соловьев, Т.М. Крутская, А.А. Разумаков, Д.Д. Головин, О.В. Нецкина // *Перспективные материалы*. – 2014. – № 2. – С. 60–65.

34. Синтез высокодисперсного порошка высшего карбида хрома с использованием нановолокнистого углерода / Ю.Л. Крутский, К.Д. Дюкова, А.Г. Баннов, А.В. Ухина, В.В. Соколов, А.Ю. Пичугин, Т.М. Крутская, О.В. Нецкина, В.В. Самойленко // *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2014. – № 3. – С. 3–8. – doi: 10.17073/1997-308X-2014-3-3-8.

35. Физико-химические свойства окислов: справочник / под ред. Г.В. Самсонова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.

36. *Войтович Р.Ф.* Окисление карбидов и нитридов. – Киев: Наукова думка, 1981. – 191 с.

37. *Жильев В.А.* Структурно-химическое исследование высокотемпературного окисления соединений некоторых переходных металлов IV–V групп с углеродом, азотом и кислородом: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 02.00.04. – Свердловск, 1974. – 28 с.

38. Анализ тугоплавких соединений / Г.В. Самсонов, А.Т. Пилипенко, Т.Н. Назарчук, О.И. Попова, Т.Я. Косолапова, В.А. Оболончик, Г.Х. Котляр, Л.Н. Кучай, В.П. Копылова, Г.Т. Кабанник, А.Х. Клибус, К.Д. Модылевская, С.В. Радзиковская. – М.: Металлургиздат, 1962. – 256 с.

Крутский Юрий Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химической технологии Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – синтез тугоплавких соединений. Имеет более 20 публикаций. E-mail: j_krutskii@rambler.ru

Дюкова Ксения Дмитриевна, аспирант, инженер кафедры химии и химической технологии Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: синтез тугоплавких соединений, термический анализ. Имеет более 10 публикаций. E-mail: Dyukova_kx701@mail.ru

Баннов Александр Георгиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химической технологии Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: синтез углеродных материалов, термический анализ. Имеет более 20 публикаций. E-mail: bannov_a@mail.ru

Максимовский Евгений Анатольевич, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории эпитаксиальных слоев Института неорганической химии Сибирского отделения Российской академии наук (ИНХ СО РАН). Преподаватель Новосибирского государственного университета. Основные направления научных исследований: физическая химия, электронная микроскопия. Имеет более 70 публикаций. E-mail: eugene@niic.nsc.ru

Ухина Арина Викторовна, инженер Института химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук (ИХТТМ СО РАН). Основное направление научных исследований – неравновесные твердофазные системы. Имеет более 10 публикаций. E-mail: a.ukhina@ngs.ru

Крутская Татьяна Михайловна, кандидат химических наук, доцент кафедры химии Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (СибСТРИН). Основное направление научных исследований – синтез тугоплавких соединений. Имеет более 10 публикаций. E-mail: t.krutskaya@mail.ru

Нецкина Ольга Владимировна, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории исследования гидридных соединений Института катализа Сибирского отделения Российской академии наук (ИК СО РАН). Основные направления научных исследований: катализ, элементный анализ. Имеет более 30 публикаций. E-mail: netskina@catalysis.ru

Кузнецова Валентина Викторовна, студент кафедры химии и химической технологии Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – синтез тугоплавких соединений. Имеет одну публикацию. E-mail: ky_vaf@mail.ru

Synthesis of fine zirconium carbide powder with carbon nanofibers *

*Yu.L. KRUTSKII*¹, *K.D. DYUKOVA*², *A.G. BANNOV*³, *E.A. MAKSIMOVSKII*^{4,5},
*A.V. UKHINA*⁶, *T.M. KRUTSKAYA*⁷, *O.V. NETSKINA*⁸, *V.V. KUZNETSOV*⁹

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: j_krutskii@rambler.ru*

² *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD student. E-mail: dyukova_kx701@mail.ru*

³ *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD (Eng.), assistant professor. E-mail: bannov_a@mail.ru*

⁴ *Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch Russian, Academy of Sciences, 3, Acad. Lavrentiev Avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, PhD (Chem.), senior researcher. E-mail: eugene@niic.nsc.ru*

⁵ *Novosibirsk State University, 2, Pirogova St, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, PhD (Eng.). E-mail: eugene@niic.nsc.ru*

⁶ *Institute of Solid State Chemistry, Siberian Branch, Russian, Academy of Sciences, 18, Kutateladze St., Novosibirsk, 630128, Russian Federation, engineer. E-mail: a.ukhina@ngs.ru*

* Received 3 July 2015.

⁷Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113 Leningradskaya St, Novosibirsk, 630008, Russian Federation, PhD (Chem.), associate professor. E-mail: t.krutskaya@mail.ru

⁸Institute of Catalysis, Siberian Branch Russian, Academy of Sciences, 5, Acad. Lavrentiev Prospekt, Novosibirsk, 63090, Russian Federation, PhD (Chem.), associate professor. E-mail: netskina@catalysis.ru

⁹Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student. E-mail: ky_vaf@mail.ru

The article presents the results of studying the process of fine zirconium carbide powder synthesis and analyzing its characteristics and properties. Zirconium carbide was prepared by zirconium reduction by nanofibrous carbon in a resistance furnace with a graphite heater. The presence of zirconium carbide in the samples was found by X-ray analysis. The content of zirconium and impurities were found by X-ray fluorescence analysis, the total carbon concentration was determined by burning the sample in an oxygen flow followed by the determination of CO₂. The morphology and particle size were determined by scanning electron microscopy. According to the results of local energy dispersive X-ray microanalysis the samples were presented predominantly by zirconium and carbon. A specific surface area, pore volume and diameter were determined by the BET method. The density of the samples was found. The sedimentation analysis was carried out. Thermal stability was studied by a simultaneous thermal analysis in oxygen during heating to a temperature of 1100 °C. The corrosion resistance of the resulting carbide in sulfuric acid was also studied. The optimal parameters of the zirconium carbide synthesis were a 60-minute exposure at temperatures from 2000 to 2100 °C. The resulting materials were presented by a single phase – zirconium carbide with an impurity content of about 3 %. It consisted of aggregated particles with a size less than 20 microns. The specific surface of the material ranged from 1.3 to 1.8 m²/g. The oxidation of zirconium carbide began at 480 °C, the process ended at 800 °C. Carbide decomposition was negligible under exposure in a sulfuric acid solution at room temperature. Thus, the corrosion resistance of the resulting material can be compared with a coarse material (40...50 microns) powder with a similar compound.

Keywords: fine dispersed powder, zirconium carbide, carbothermal reduction, characteristics, properties, morphology, particle size, nanofibrous carbon

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-3-192-205

REFERENCES

1. Kosolapova T.Ya., ed. *Svoistva, poluchenie i primeneniye tugoplavkikh soedinenii: spravochnik*. [Properties, synthesis and application of refractory materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 928 p.
2. Adamovskii A.A. Karbidy perekhodnykh metallov v protsessakh abrazivnoi obrabotki // [Carbides of transition metals in abrasive machining] *Poroshkovaya metallurgiya – Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2007, no. 11/12, pp. 96–111.
3. Wang S.-L., Li K.-Z., Li H.-J., Zhang Y.-L. Microstructure and ablation resistance of ZrC nanostructured coating for carbon/carbon composites. *Materials Letters*, 2013, vol. 107, pp. 99–102. doi: 10.1016/j.matlet.2013.05.124
4. Qu Q., Han J., Han W., Zhang X., Hong C. In situ synthesis mechanism and characterization of ZrB₂-ZrC-SiC ultra high-temperature ceramics. *Materials Chemistry and Physics*, 2008, vol. 110, iss. 2–3, pp. 216–221. doi: 10.1016/j.matchemphys.2008.01.041
5. Naumenko V.Ya. Poluchenie karbidov perekhodnykh metallov IV-V grupp v oblastiakh ikh gomogennosti [Preparation carbides of transition metals of IV-V groups in their areas homogeneity] *Poroshkovaya metallurgiya – Soviet powder metallurgy and metal ceramics*, 1970, no. 10, pp. 20–22.
6. Song M.S., Huang B., Zhang M.X., Li J.G. In situ synthesis of ZrC particles and its formation mechanism by self-propagating reaction from Al-Zr-C elemental powders. *Powder Technology*, 2009, vol. 191, iss. 1–2, pp. 34–38. doi: 10.1016/j.powtec.2008.09.005

7. Hu Q., Zhang M., Luo P., Song M., Li J. Thermal explosion synthesis of ZrC particles and their mechanism of formation from Al-Zr-C elemental powders. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, vol. 35, pp. 251–256. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2012.06.008
8. Zhang M.X., Huang B., Hu Q.D., Li J.G. Study of formation behavior of ZrC in the Cu-Zr-C system during combustion synthesis. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, vol. 31, pp. 230–235. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2011.11.008
9. Zhang M.X., Hu Q.D., Huang B., Li J.Z., Li J.G. Study of formation behavior of ZrC in the Fe-Zr-C system during combustion synthesis. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2011, vol. 29, iss. 5, pp. 596–600. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2011.04.002
10. Li J., Fu Z.Y., Wang W.M., Wang H., Lee S.H., Niihara K. Preparation of ZrC by self-propagating high-temperature synthesis. *Ceramics International*, 2010, vol. 36, iss. 5, pp. 1681–1686. doi: 10.1016/j.ceramint.2010.03.013
11. Won H.I., Hauk N., Won C.V., Lee H.H. Simple synthesis of nano-sized refractory metal carbides by combustion process // *Journal of Materials Science*, 2011, vol. 46, iss. 18, pp. 6000–6006. doi: 10.1007/s10853-011-5562-0
12. Wang L., Si L., Zhu Y., Qian Y. Solid-state reaction synthesis of ZrC from zirconium oxide at low temperature. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2013, vol. 38, pp. 134–136. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2012.12.001
13. Elyutin V.P., Pavlov Yu.A., Polyakov V.P., Sheboldaev S.B. *Vzaimodeistvie okislov metallov s uglerodom* [The interaction of metal oxides with carbon]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976. 360 p.
14. Stolle S., Gruner W., Pitschke W., Berger L.-M., Wetzig K. Comparative microscale investigations of the carbothermal synthesis of (Ti, Zr, Si) carbides with oxide intermediates of different volatilities. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2000, vol. 18, iss. 1, pp. 61–72. doi: 10.1016/S0263-4368(00)00018-4
15. Gruner W., Stolle S., Wetzig K. Formation of CO_x species during the carbothermal reduction of oxides of Zr, Si, Ti, Cr, W and Mo. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2000, vol. 18, iss. 2–3, pp. 137–145. doi: 10.1016/S0263-4368(00)00013-5
16. Sondhi A., Morandi C., Reidy R.F., Scharf T.W. Theoretical and experimental investigations on the mechanism of carbothermal reduction of zirconia. *Ceramics International*, 2013, 39, iss. 4, pp. 4489–4497. doi: 10.1016/j.ceramint.2012.11.043
17. Vodop'yanov A.G., Kozhevnikov G.N., Baranov S.V. *Vzaimodeistvie tugoplavkikh oksidov metallov s uglerodom* [Interaction of refractory metal oxides with carbon]. *Uspekhi khimii – Russian Chemical Reviews*, 1988, vol. 57, no. 9, pp. 1419–1439. (In Russian)
18. Shumilova R.G., Kosolapova T.Ya. Poluchenie karbida tsirkoniya v polupromyshlennom masstabe [Production of zirconium carbide on a pilot-plant scale]. *Poroshkovaya metallurgiya – Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1968, no. 4 (64), pp. 86–89. (In Russian)
19. Seo M., Kang S., Kim Y., Ryu S.-S. Preparation of highly dispersed ultra-fine ZrC by combination of carbothermal reduction of ball-milled ZrO₂ and C mixture and bead milling. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2013, vol. 41, pp. 345–350. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2013.05.007
20. Sacks M.D., Wang C.-A., Yang Z., Jain A. Carbothermal reduction synthesis of nanocrystalline zirconium carbide and hafnium carbide powders using solution-derived precursors. *Journal of Materials Science*, 2004, vol. 39, iss. 19, pp. 6057–6066. doi: 10.1023/B:JMSC.0000041702.76858.a7
21. Yan Y., Huang Z., Liu X., Jiang D. Carbothermal synthesis of ultra-fine zirconium carbide powders using inorganic precursors via sol-gel method. *Journal of Sol-Gel Science Technology*, 2007, vol. 44, iss. 1, pp. 81–85. doi: 10.1007/s10971-007-1595-x
22. Dolle M., Gosset D., Bogicevic C., Karolak F., Simeone D., Baldinozzi G. Synthesis of nano-sized zirconium carbide by a sol-gel route. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, vol. 27, iss. 4, pp. 2061–2067. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.06.005
23. Tao X.Y., Qiu W.F., Li H., Zhao T. One pot synthesis of soluble polymer for zirconium carbide. *Chinese Chemical Letters*, 2010, vol. 21, iss. 5, pp. 620–623. doi: 10.1016/j.ccl.2010.01.002
24. Zhao D., Hu H., Zhang C., Zhang Y., Wang J. A simple way to prepare precursors for zirconium carbide. *Journal of Materials Science*, 2010, vol. 45, iss. 23, pp. 6401–6405. doi: 10.1007/s10853-010-4722-y
25. Yan C., Liu R., Cao Y., Zhang C., Zhang D. Carbothermal synthesis of submicrometer zirconium carbide from polyzirconoxane and phenolic resin by the facile one-pot reaction. *Journal of the American Ceramic Society*, 2012, vol. 95, iss. 1, pp. 3366–3369. doi: 10.1111/j.1551-2916.2012.05456.x

26. Chu A., Qin M., Rafi-ud-din, Zhang L., Lu H., Jia B., Qu X. Carbothermal synthesis of ZrC powders using a combustion synthesis precursor. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2013, vol. 36, pp. 204–210. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2012.08.016
27. Yan C., Liu R., Cao Y., Zhang C., Zhang D. Synthesis of zirconium carbide powders using chitosan as carbon source. *Ceramics International*, 2013, vol. 39, iss. 3, pp. 3409–3412. doi: 10.1016/j.ceramint.2012.09.032
28. Ang C., Williams T., Seeber A., Wang H., Cheng Y.-B. Synthesis and evolution of zirconium carbide via sol-gel route: features of nanoparticle oxide-carbon reactions. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, vol. 96, iss. 4, pp. 1099–1106. doi: 10.1111/jace.12260
29. Xie J., Fu Z., Wang Y., Lee S.W., Niihara K. Synthesis of nanosized zirconium carbide powders by a combinational method of sol-gel and pulse current heating. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, vol. 34, iss. 1, pp. 13.e1–13.e7. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.07.003
30. Zhukov M.F., Panin V.E., execut. eds. *Novye materialy i tekhnologii. Ekstremal'nye tekhnologicheskie protsessy* [New materials and technologies. Extreme technical processes]. Novosibirsk, Nauka Publ., Siberian Branch, 1992, pp. 40–63.
31. Kuvshinov G.G., Mogilnykh Yu.L., Kuvshinov D.G., Yermakov D.Yu., Yermakova M.A., Salanov A.N., Rudina N.A. Mechanism of porous filamentous carbon granule formation on catalytic hydrocarbon decomposition. *Carbon*, 1999, vol. 37, iss. 8, pp. 1239–1246. doi: 10.1016/S0008-6223(98)00320-0
32. Kuvshinov G.G., Zavarukhin S.G., Mogilnykh Yu.I., Kuvshinov D.G. Realizatsiya protsessa polucheniya granulirovannogo kataliticheskogo voloknistogo ugleroda v masshtabe pilotnogo reaktora [Implementation of production of granular catalytic filamentous carbon on the scale of a pilot reactor]. *Khimicheskaya promyshlennost' – Russian Chemical Industry*, 1998, no. 5, pp. 300–307. (In Russian)
33. Krutskii Yu.L., Bannov A.G., Antonova E.V., Shinkarev V.V., Maksimovskii E.A., Ukhina A.V., Solov'ev E.A., Krutskaya T.M., Razumakov A.A., Golovin D.D., Netskina O.V. Sintez vysokodispersnogo poroshka karbida titana s ispol'zovaniem nanovoloknistogo ugleroda [Synthesis of titanium carbide fine powder using nanofibrous carbon]. *Perspektivnye materialy – Inorganic Materials: Applied Research*, 2014, no. 2, pp. 21–27. (In Russian)
34. Krutskii Yu.L., Dyukova K.D., Bannov A.G., Ukhina A.V., Sokolov V.V., Pichugin A.Yu., T.M. Krutskaya, Netskina O.V., Samoilenko V.V. Sintez vysokodispersnogo poroshka vysshego karbida khroma s ispol'zovaniem nanovoloknistogo ugleroda [Synthesis of high-dispersive powder of high chromium carbide with the use of nanofibrous carbon]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya – Proceedings of Higher Schools. Powder Metallurgy and Functional Coatings*, 2014, no. 3, pp. 3–8. doi: 10.17073/1997-308X-2014-3-3-8. (In Russian)
35. Samsonov G.V., ed. *Fiziko-khimicheskie svoistva okislov. Spravochnik* [Physico-chemical properties of oxides. Handbook]. 2nd ed., rev. and enl. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 472 p.
36. Voitovich R.F. *Okislenie karbidov i nitridov* [Oxidation of carbides and nitrides]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1981. 191 p.
37. Zhilyaev V.A. *Strukturno-khimicheskoe issledovanie vysokotemperaturnogo okisleniya soedinenii nekotorykh perekhodnykh metallov IV–V grupp s uglem, azotom i kislorodom*. Avtoref. diss. kand. khim. nauk [Structural chemical investigation of high-temperature oxidation of some combinations of IV–V group transition metals with carbon, nitrogen and oxygen. Author's abstract of PhD chem. sci. diss.]. Sverdlovsk, 1974. 28 p.
38. Samsonov G.V., Pilipenko A.T., Nazarchuk T.N., Popova O.I., Kosolapova T.Ya., Obolonchik V.A., Kotlyar G.Kh., Kuchai L.N., Kopylova V.P., Kabannik G.T., Klibus A.Kh., Modylevskaya K.D., Radzikovskaya S.V. *Analiz tugoplavkikh soedinenii* [Analysis of refractory compounds]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1962. 256 p.

Правила для авторов

Журнал «Научный вестник НГТУ» основан в 1995 году на базе Новосибирского государственного технического университета. Печатная версия журнала зарегистрирована в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций в 2000 году. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1599 от 10.02.2000 г. Периодичность выхода издания – один раз в три месяца (четыре номера в год). Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование. Публикация статей бесплатная.

В журнале «Научный вестник НГТУ» публикуются оригинальные статьи по следующим группам специальностей:

05.07.00 – Авиационная и ракетно-космическая техника;

05.11.00 – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы;

05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление;

05.14.00 – Энергетика;

05.17.00 – Химическая технология.

Разделы журнала: автоматическое управление и идентификация; обработка информации; моделирование процессов и устройств; современные информационные технологии; энергетика, химическая технология.

Рекомендуемый объем статьи – 10–16 страниц. Статьи объемом, не превышающим 8 страниц, могут быть размещены в разделе «Краткие сообщения». Возможна публикация дискуссионного материала в разделе «Дискуссии». В информационном разделе возможно размещение сообщений о конференциях, семинарах, симпозиумах, состоявшихся и планируемых, сведений о факультетах и специальностях, научных разработках и научных школах. Статьи обзорного характера, как правило, не публикуются.

Web site: <http://journals.nstu.ru/vestnik>

Условия приема статей

В редакцию **Научного вестника НГТУ** представляются следующие материалы.

1. Статья, подготовленная в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, два экземпляра, подписанных авторами.

2. Контактная информация (телефоны раб. и сот., адреса электронной почты, место работы, адрес места работы, должность, ученая степень, ученое звание автора) – печатная версия, два экземпляра.

3. Описание статьи для базы данных «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)», подготовленное в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, один экземпляр.

4. Лицензионный договор, заполненный и подписанный, отправляется со всем пакетом документов; сканированный заполненный договор записывается на диск.

5. Электронная версия статьи, контактной информации, описания статьи для базы данных РИНЦ, сканированный лицензионный договор – в отдельных файлах на CD.

6. Экспертное заключение о возможности опубликования.

7. Авторы, не являющиеся сотрудниками НГТУ, предоставляют сопроводительное письмо на имя проректора по научной работе НГТУ.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Требования к оформлению статьи

Формат оригиналов – **A4**. Шрифт – **Times New Roman**. Текст набирается в русифицированном редакторе **Microsoft Word**. Параметры страницы (см):

левое поле – 3,3	верхнее поле – 4,0
правое поле – 3,3	нижнее поле – 3,9
текстовое поле 22 × 14,4	

Межстрочные интервалы одинарные. Перед УДК оставляется четыре пустые строки – кегль 12. УДК набирается прописными буквами кеглем 8. После УДК перед заголовком оставляется пустая строка размером 8. Название статьи набирается кеглем 14, полужирным строчным шрифтом, с отступом слева 1,8 см, без переносов слов с выравниванием влево. После заголовка оставляется пустая строка размером 12. Фамилии автора – прописным шрифтом кеглем 8. После фамилий оставляется пустая строка размером 7. Указатель сноски * после названия статьи устанавливается в верхнем индексе. В сноске дата поступления статьи указывается курсивным шрифтом кеглем 8. После ФИО авторов статьи набирается аннотация кеглем 8 с отступом первой строки на 0,8 см с межстрочным интервалом с множителем 1,1. После аннотации оставляется пустая строка размером 4. **Ключевые слова** – кеглем 8.

Заголовки разделов обязательны (например, **Введение, Постановка задачи, Методы анализа, Основной результат, Выводы** или **Заключение** – прописным кеглем 8 полужирным прямым шрифтом с отступом 1,8 см. Перед ними оставляется пустая строка размером 20, после – пустая строка размером 10. Основной текст – кеглем 10.

Подзаголовки – прописным полужирным шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними оставляется пустая строка размером 10, после них – пустая строка размером 10.

Рисунки представляются в **Corel Draw 11** или **Microsoft Word (RUS)**. Рисунки в других редакторах не принимаются. Подрисуночные надписи и названия таблиц – кеглем 9. Слово *Рис.* и его номер выделяются курсивом. Рисунки должны быть черно-белыми, в подписях не должно быть ссылок на цвет.

Переменные в тексте – курсивным шрифтом кеглем 10. При написании формул использовать MathType версии не выше 6.0С. Формулы набирать по центру кеглем 11, надстрочные и подстрочные индексы – кеглем 9, знаки – кеглем 14 (латинские – курсивным шрифтом, русские и греческие – прямым, цифры – прямым):

$$A(s) = \sum_{i=0}^{n^2+3} A_i s \lambda^{(i+1)^2} + \alpha.$$

Между текстом и формулами, а также между формулами оставляются пустые строки размером 4. Формулы не сжимать. Нумерацию формул помещать справа кеглем 10. Например,

$$D_f = D_c D + N_c N. \quad (1)$$

Нумерация страниц производится следующим образом:

Вставка/Номера страниц...; установить **положение** «вверху страницы», **выравнивание** – «снаружи», без нумерации первой страницы.

Колонтитулы устанавливаются вверху (с отступом от верхнего края страницы в 3 см). Чтобы колонтитулы на четной, нечетной и первой страницах отличались, нужно установить:

Файл/Параметры страницы/Разметка; установить **разные четные и нечетные и первая отличается**.

Колонтитулы для четных страниц. Вид/Колонтитулы; набираются курсивным прописным шрифтом кеглем 8. Фамилия автора с инициалами впереди – у правого края без отступа. Если авторов несколько, то указываются только два первых, далее «и др.».

Колонтитулы на нечетных страницах. Названия статьи (не более чем на треть строки) с прописной буквы курсивным шрифтом кеглем 8. Номера страниц – кеглем 10.

Перед списком литературы пропускается пустая строка размером 20. Заголовок «Список литературы» – кеглем 8 прописным полужирным шрифтом с отступом 1,8 см. После списка литературы – пустая строка размером 10. Порядковый номер – с красной строки кеглем 8 с интервалом 1,1. Фамилии и инициалы – кеглем 8 полужирным строчным шрифтом, название статьи (книги) – светлым тем же шрифтом. Оформление библиографического списка – по ГОСТ Р.7.0.5–2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. – М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с.

После списка литературы идет пустая строка размером 24. Далее приводятся краткие сведения об авторах – кеглем 8 с интервалом 1,1 и с отступом от левого края 1 см. Фамилия, имя, отчество – с красной строки курсивом. Последующий текст (ученая степень, ученое звание, членство в академиях и т.д.; основное направление научных исследований; количество имеющихся публикаций, в том числе монографий, учебных пособий, e-mail, рабочий телефон) – прямым шрифтом.

Далее дается перевод на английский язык фамилии, имени, отчества и названия статьи, а также реферата и ключевых слов (обязательно).

Исправления, вносимые автором, при доработке статьи **выделять** желтым цветом.

Требования к оформлению РИНЦ

В описании статьи должна быть указана следующая информация.

1. Номера страниц, на которых размещена статья в сборнике.
2. Коды: УДК и/или ББК, и/или DOI, и/или других классификационных индексов или систем регистрации.
3. Название статьи.
4. Фамилия, имя, отчество авторов.
5. Место работы каждого автора в именительном падеже. Указать должность автора по основному месту работы.
6. Контактная информация (почтовый адрес места работы, номер телефона, адрес электронной почты – обязательно).
7. Аннотация (не менее 320 и не более 640 знаков).
8. Ключевые слова: каждое слово или словосочетание отделяется от другого запятой (10–20 слов).
9. Пункты 3–8 на английском языке.
10. Список литературы.

Образец оформления приведен на сайте <http://vestnik.infoterra.ru/index.php>