СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ISSN 2782-2001

№ 3 (91) **2023**

УДК 681.51(06)
С 409

Учредитель

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Редакционная коллегия

Главный редактор

Лемешко Борис Юрьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Заместители главного редактора

Вострецов Алексей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Шокин Юрий Иванович, академик, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск

Ответственный секретарь

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

Члены редколлегии

Володин Андрей Игоревич, канд. физ.-мат. наук, доктор философии по статистике Университета Регины, проф., Канада
Воронин Владимир Викторович, д-р техн. наук, доцент, ТОГУ, г. Хабаровск
Воскобойников Юрий Евгеньевич, д-р физ.-мат. наук, проф., Сибстрин, г. Новосибирск
Гайдук Анатолий Романович, д-р техн. наук, проф., ЮФУ, г. Таганрог
Генералов Владимир Михайлович, д-р техн. наук, ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора, г. Новосибирск
Григорьев Юрий Дмитриевич, д-р техн. наук, проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург
Гриф Михаил Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Дмитриев Александр Капитонович, д-р физ.-мат. наук, НГТУ, г. Новосибирск
Комаров Андрей Константинович, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
Крюков Андрей Васильевич, д-р техн. наук, проф., ИрГУПС, г. Иркутск
Лисицына Лилия Ивановна, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Наумова Елена Николаевна, д-р техн. наук, проф., Университет Тафтса, США
Носек Ярослав, д-р техн. наук, проф., Технический университет Либерец, Чехия
Ронжин Андрей Леонидович, д-р техн. наук, проф., СПб ФИЦ РАН, г. Санкт-Петербург
Рубан Анатолий Иванович, д-р техн. наук, проф., СФУ, г. Красноярск
Сидоров Денис Николаевич, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт систем энергетики им. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск
Уранчимэг Тудевдагва, д-р техн. наук, проф., Хемницкий технический университет, Германия
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
Ханова Анна Алексеевна, д-р техн. наук, проф., АГТУ, г. Астрахань
Хлебников Михаил Владимирович, д-р физ.-мат. наук, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва
Шандаров Станислав Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., ТУСУР, г. Томск

Адрес редакции и издателя: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корп. 7, комн. 409, 417
Тел. (383) 346-56-88, тел., факс (383) 344-49-98
E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru
Web Site: http://journals.nstu.ru/vestnik/

16+

Индекс: 82962 («РОСПЕЧАТЬ») **УДК 681.51(06)**

© Коллектив авторов, 2023
© Новосибирский государственный технический университет, 2023

СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ISSN 2782-2001

№ 3 (91) **2023**

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Буй Т.В. Математическая модель стабилизированной платформы с электрогидроприводом на корабле 7

Григорьев Ю.Д. Задача о беспорядках 19

Воевода А.А., Шипагин В.И. Применение модального метода синтеза для дискретных систем 37

Деревянов М.Ю. Анализ показателей масштабирования при оценке ресурсного потенциала объектов системы переработки нефтесодержащих отходов на основе метода DEA 47

Черкашин Е.А. Применение нейронных сетей для классификации объектов в видеоданных в задачах автоматического мониторинга состояния биологических объектов 69

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

Льготчиков В.В., Ларькина Т.С. Проектирование индукционного устройства для нагрева жидкой среды 87

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

Белавская С.В., Лисицына Л.И., Разинкин В.П., Винская Е.К., Хрусталёв В.А., Кузьмин А.Н., Марков А.В. Электромагнитная система для деструкции биологических тканей на частоте 27,12 МГц 105

Жбанова В.Л., Якименко И.В. Интерполяция при микросканировании двухслойных матричных фотоприемников 121

Савинов К.Н., Головин Н.Н., Дмитриева Л.Р., Дмитриев А.К., Котина Д.М. Способ обработки спектра излучения лазера на основе экспериментально записанной формы пропускания интерферометра Фабри – Перо 141

Правила для авторов 152

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

Новосибирский государственный технический университет
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

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

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации
средства массовой информации ПИ № ФС77-76010 от 03 июля 2019 г.
Периодичность издания – 4 номера в год.
Подписано в печать 19.09.2023. Выход в свет 28.09.2023.
Формат 70 × 108 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экземпляров.
Уч.-изд. л. 13,65. Печатных листов 9,75. Издательский № 174. Заказ № 252
Цена свободная

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

ANALYSIS AND DATA PROCESSING SYSTEMS

ISSN 2782-2001

№ 3 (91) **2023**

УДК 681.51(06)
С 409

Journal was established by

Novosibirsk State Technical University

Editorial board

Chief editor

Lemeshko B. Yu., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Deputy chief editor

Vostretsov A. G., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Shokin Yu. I., D.Sc. (Phys.& Math.), Institute of Computational Technologies, Novosibirsk, RF

Executive Secretary

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

The members of the editorial Board

Volodin A. I., D.Sc. (Phys. & Math.), Doctor of Philosophy in Statistics from the University of Regina, Professor of Statistics University of Regina, Canada
Voronin V. V., D.Sc. (Eng.), Pacific national University, Khabarovsk, RF
Voskoboinikov Yu. E., D.Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, RF
Gaiduk A. R., D.Sc. (Eng.), Southern Federal University, Taganrog, RF
Generalov V. M., D.Sc. (Eng.), FBUN GNTS VB «Vektor» Rospotrebnadzora, Novosibirsk, RF
Grigor'ev Yu. D., D.Sc. (Eng.), Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, RF
Grif M. G., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Dmitriev A. K., D.Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Komarov A. K., D.Sc. (Phys. & Math.), Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, RF
Kryukov A. V., D.Sc. (Eng.), Irkutsk State Transport University, Irkutsk, RF
Lisitcina L. I., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Naumova E. N., PhD. (Math.), Tufts University, USA
Nosek J., D.Sc. (Eng.), Technical University of Liberec, Czech Republic
Ronzhin A. L., D.Sc. (Eng.), Federal Research Center Russian Academy of sciences, Saint-Petersburg, RF
Ruban A. I., D.Sc. (Eng.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, RF
Sidorov D. N., D.Sc. (Phys. & Math.), Melentiev Energy Systems Institute, Irkutsk, RF
Uranchimeg T., D.Sc. (Eng.), Technische Universität Chemnitz, Germany
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
Khanova A. A., D.Sc. (Eng.), Astrakhan State Technical University, Astrakhan, RF
Khlebnikov M. V., D.Sc. (Phys. & Math.), Institute of Control Sciences, Moscow, RF
Shandarov S. M., D.Sc. (Phys. & Math.), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, RF

Editorial Adress: 20 K. Marx Prospekt, building 7, rooms 409 and 417, Novosibirsk, 630073
Tel. (383) 346-56-88, Fax (383) 344-49-98
E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru
Web Site: http://journals.nstu.ru/vestnik/

УДК 681.51(06)

© Authors, 2023
© Novosibirsk State Technical University, 2023

ANALYSIS AND DATA PROCESSING SYSTEMS

ISSN 2782-2001

№ 3 (91) **2023**

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND TELECOMMUNICATIONS

Bui T.V. A mathematical model of a stabilized platform with electro-hydraulic drive on a ship..... 7

Grigoriev Yu.D. Disorders Problem 19

Voevoda A.A., Shipagin V.I. Application of the modal design method for discrete systems 37

Derevyanov M.Yu. Analysis of scaling indicators when assessing the resource potential of objects of the oil-contaminated waste recycling system based on the DEA method..... 47

Cherkashin E.A. Application of neural networks for the classification of objects in video data in the tasks of automatic monitoring of the condition of biological objects..... 69

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION SCIENCE

Lgotchikov V.V., Larkina T.S. Designing an induction device for heating a liquid medium 87

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

Belavskaya S.V., Lisitsyna L.I., Razinkin V.P., Vinskaya E.K., Khrustalev V.A., Kuzmin A.N., Markov A.V. An electromagnetic system for the destruction of biological tissues at a frequency of 27.12 MHz..... 105

Zhbanova V.L., Yakimenko I.V. Interpolation in microscaning two-layer matrix photoreceivers 121

Savinov K.N., Golovin N.N., Dmitrieva L.R., Dmitriev A.K., Kotina D.M. A method for processing the laser radiation spectrum based on the experimentally recorded transmission form of the Fabry-Perot interferometer 141

Rules for authors..... 152

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

Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

The journal is registered in the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media. The certificate of registration of mass media ПИ № ФС77-76010 dated July 03, 2019.
Publication frequency – 4 numbers a year.
Signed in print September 19, 2023.
Date of publication September 28, 2023. Format 70 × 108 1/16
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 13,65. Printed pages 9,75.
Publishing number 174. Order number 252

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

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 91, № 3, 2023, с. 7–18

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 91, No. 3, 2023, pp. 7–18

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.873

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-7-18

Математическая модель стабилизированной платформы с электрогидроприводом на корабле*

Т.В. БУЙ

630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

tamtlpt@gmail.com

Стабилизированные платформы применяются на всех типах движущихся транспортных средств, от спутников до подводных лодок, и даже используются на некоторых портативных и наземных устройствах. Например, стабилизированная платформа на корабле используется для размещения навигационного оборудования и антенн систем радиолокационной связи, что позволяет улучшить эффективность работы этого оборудования в условиях воздействий волновых возмущений. Существуют различные кинематические схемы построения корабельных стабилизированных платформ. В частности, применяются последовательные стабилизированные платформы и параллельные стабилизированные платформы. В практических приложениях более широкое применение нашли последовательные стабилизированные платформы. В настоящей работе рассматривается математическая модель корабельной стабилизированной платформы с двумя степенями свободы, в которой управление угловой ориентацией платформы осуществляется с помощью электрогидроприводов. Применение электрогидравлических приводов позволяет обеспечить формирование требуемой величины силового воздействия для компенсации возмущений от волновых колебаний палубы корабля. С целью получения соотношений для описания взаимосвязи угловых перемещений элементов кинематической схемы платформы с величиной перемещения штока гидроцилиндра в настоящей работе привлекается аппарат комплексных чисел. Рассмотрена математическая модель электрогидропривода с учетом динамики перемещения электромеханизма золотникового сервоклапана, величин расходов и давлений рабочей жидкости в полостях гидроцилиндра. Рассмотрена линеаризованная математическая модель электрогидропривода и получены оценки для параметров математической модели при заданных массогабаритных характеристиках электрогидропривода. Данная математическая модель может быть использована при синтезе системы управления электрогидроприводом для обеспечения заданной угловой ориентации платформы при действии волновых возмущений.

Ключевые слова: стабилизированная платформа, кинематическая схема, угловая стабилизация, стабилизация крена, стабилизация тангажа, волновые возмущения, электрогидравлический привод, математическая модель электрогидропривода, линеаризованная математическая модель, параметры модели электрогидропривода

* *Статья получена 19 февраля 2023 г.*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе рассматривается задача построения математической стабилизированной платформы, которая установлена на палубе водного судна. Платформа используется для размещения навигационного оборудования и радиолокационных антенн систем связи, для эффективной работы которых требуется обеспечить стабилизацию положения платформы в пространстве в условиях волновых возмущений водной среды [1–3]. С целью уменьшения влияния данных возмущений навигационное оборудование размещают на специальной стабилизируемой платформе [4–7]. В частности, применяются последовательные стабилизированные платформы и параллельные стабилизированные платформы [8]. В практических приложениях более широкое применение нашли последовательные стабилизированные платформы [9–13].

Существует множество примеров использования стабилизированных платформ, например, в гироскопических навигационных системах [14–17]. Эффективность и точность угловой стабилизации платформы достигается с помощью системы автоматического управления, для проектирования которой требуется математическая модель платформы. Вид математической модели стабилизированной платформы зависит от ее конструкции, количества степеней свободы и типа привода [18–21]. В работе рассмотрена математическая модель стабилизированной платформы с электрогидроприводом.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ

В этой части рассматривается математическая модель стабилизированной платформы, размещенной на корабле с двумя степенями свободы, кинематическая схема которой показана на рис. 1.

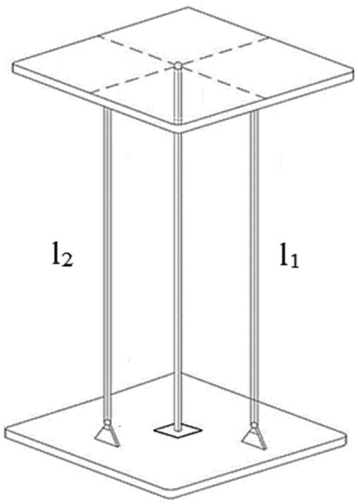


Рис. 1. Кинематическая схема стабилизированной платформы на корабле

Fig. 1. Kinematic diagram of the stabilized platform on the ship

Стабилизированная платформа связана с палубой через два привода и цилиндрическую стойку. Обычно два привода расположены под углом 90° и связаны со стабилизированной платформой шаровыми шарнирами.

Платформа с двумя степенями свободы может вращаться вокруг двух осей (тангаж и крен), как это показано на рис. 2, *а* и *б*. Управление угловым положением платформы осуществляется изменением длин звеньев l_1, l_2.

В настоящей работе обсуждается математическая модель стабилизированной платформы на корабле, угловое перемещение которой осуществляется с помощью электрогидравлического сервопривода. В качестве примера рассматривается схема стабилизированной платформы на корабле по углу тангажа, которая показана на рис. 2, *а*, где h_0, a_1, a_2, l_1 есть звенья обсуждаемой кинематической схемы; на рис. 2, *б* рассматривается схема стабилизированной платформы на корабле по углу крена с параметрами h_0, b_1, b_2, l_2. Звено a_2 на этой схеме представляет платформу, а изменение угла наклона β_p данного звена относительно палубы корабля достигается путем изменения длины звена l_1 с помощью электрогидравлического сервопривода.

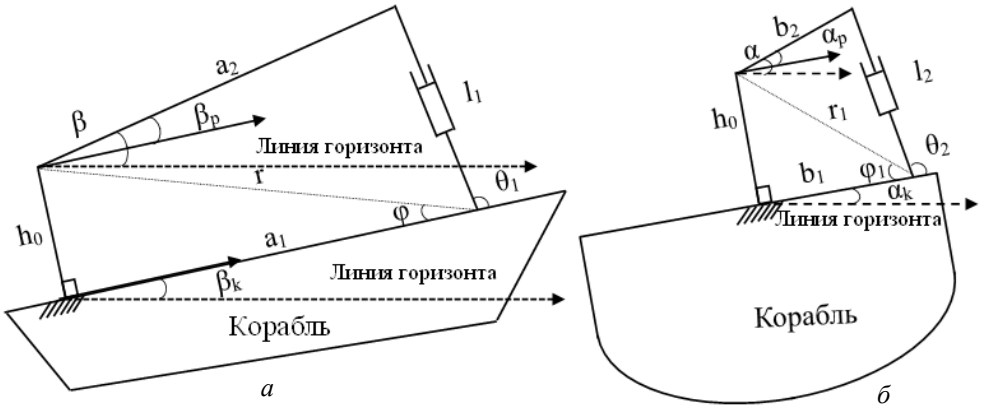


Рис. 2. Кинематическая схема платформы на корабле по углу тангажа (*а*); кинематическая схема платформы на корабле по углу крена (*б*)

Fig. 2. Kinematic diagram of the platform on the ship by pitch angle (*a*); kinematic diagram of the platform on the ship by roll angle (*b*)

Представляя звенья на рис. 2, *а* в виде комплексных чисел [13] для данной замкнутой кинематической цепи, получим следующее уравнение:

$$h_0 i + a_2 e^{i\beta_p} - l_1 e^{i\beta_p} - a_1 = 0,$$

из которого следует

$$l_1 e^{i\theta_1} = -a_1 + h_0 i + a_2 e^{i\beta_p}. \quad (1)$$

Комплексное сопряжение для уравнения (1) имеет вид

$$l_1 e^{-i\theta_1} = -a_1 - h_0 i + a_2 e^{-i\beta_p}. \quad (2)$$

В результате перемножения выражений (1) и (2) получим

$$l_1^2 = h_0^2 + a_2^2 + a_1^2 - a_2 a_1 \left(e^{i\beta_p} + e^{-i\beta_p} \right) - h_0 a_2 i \left(e^{i\beta_p} - e^{-i\beta_p} \right). \quad (3)$$

Обозначим

$$k_1 = e^{i\beta_p} + e^{-i\beta_p}, \quad k_2 = e^{i\beta_p} - e^{-i\beta_p}.$$

Тогда выражение (3) можно представить в виде

$$l_1^2 = h_0^2 + a_2^2 + a_1^2 - a_2 a_1 k_1 - h_0 a_2 k_2 i. \quad (4)$$

Также отметим, что для выражений k_1 и k_2 справедливы соотношения:

$$\begin{cases} k_1 = e^{i\beta_p} + e^{-i\beta_p} = \cos\beta_p + i\sin\beta_p + \cos\beta_p - i\sin\beta_p = 2\cos\beta_p, \\ k_2 = e^{i\beta_p} - e^{-i\beta_p} = \cos\beta_p + i\sin\beta_p - \cos\beta_p + i\sin\beta_p = 2i\sin\beta_p. \end{cases} \quad (5)$$

Подставляя соотношения (5) для k_1 и k_2 в уравнение (4), получим уравнение, показывающее зависимость между длиной звена l_1 и углом наклона платформы β_p относительно палубы корабля в продольной плоскости:

$$l_1^2 = h_0^2 + a_2^2 + a_1^2 - 2a_2 a_1 \cos\beta_p + 2h_0 a_2 \sin\beta_p. \quad (6)$$

Из рис. 2, *а* следует, что $h_0 = r\sin\varphi$ и $a_1 = r\cos\varphi$. Подставляя данные выражения для h_0 и a_1 в уравнение (6), получим

$$\frac{l_1^2 - h_0^2 - a_2^2 - a_1^2}{2a_2 r} = \sin\varphi\sin\beta_p - \cos\varphi\cos\beta_p. \quad (7)$$

Здесь $r = \sqrt{h_0^2 + a_1^2}$. Обозначим $k_3 = \dfrac{a_2^2 + r^2 - l_1^2}{2ra_2}$ и преобразуем уравнение (7):

$$\cos(\varphi + \beta_p) = k_3, \quad \sin(\varphi + \beta_p) = \sqrt{1 - k_3^2}. \quad (8)$$

Из выражения (8) получим

$$\tan(\varphi + \beta_p) = \frac{\sqrt{1 - k_3^2}}{k_3}, \quad (9)$$

где в соответствии с рис. 2, *а* справедливо условие $0 \le (\varphi + \beta_p) \le \pi$. Из выражения (9) следует

$$\beta_p = -\varphi + \arctan\frac{\sqrt{1 - k_3^2}}{k_3}, \quad (10)$$

где $k_3 = k_3(l_1)$.

Представим длину звена l_1 в виде $l_1 = l_{01} + \Delta l_1$, где Δl_1 – величина перемещения штока в цилиндре электрогидравлического сервопривода, а величина l_{01} соответствует выполнению требования $\beta_p = 0$. Тогда из условия $\beta_p = 0$ в выражении (10) следует

$$\varphi = \arctan \frac{\sqrt{1 - k_3^2(l_{01})}}{k_3(l_{01})} = f(k_3(l_{01})). \tag{11}$$

Подставляя выражение (11) в уравнение (10), получим

$$\beta_p = -\arctan \frac{\sqrt{1 - k_3^2(l_{01})}}{k_3(l_{01})} + \arctan \frac{\sqrt{1 - k_3^2(l_1)}}{k_3(l_1)}. \tag{12}$$

Обозначим $f(k_3(l_1)) = \arctan \frac{\sqrt{1 - k_3^2(l_1)}}{k_3(l_1)}$ и выполним линеаризацию в окрестности точки l_{01} уравнения (12) на основе его разложения в ряд Тейлора [21]. Получим

$$\beta_p = -f(k_3(l_{01})) + f(k_3(l_{01})) + \frac{\partial f}{\partial k_3}\frac{\partial k_3}{\partial l_{01}}\Delta l = \frac{\partial f}{\partial k_3}\frac{\partial k_3}{\partial l_{01}}\Delta l_1. \tag{13}$$

Вычисляя частные производные

$$\frac{\partial f}{\partial k_3} = \frac{1}{\sqrt{1 - k_3^2}}, \qquad \frac{\partial k_3}{\partial l_{01}} = \frac{l_{01}}{r_1 a_2},$$

получим

$$\frac{\partial f}{\partial k_3}\frac{\partial k_3}{\partial l_{01}} = \frac{1}{\sqrt{1 - k_3^2}}\frac{l_{01}}{r_1 a_2} = \frac{2 l_{01}}{\sqrt{4 r_1^2 a_2^2 - c_1^2}}, \tag{14}$$

где $c_1 = a_2^2 + r^2 - l_{01}^2$. Затем, подставляя выражение (14) в уравнение (13), получим зависимость между углом наклона платформы β_p и смещением поршня Δl_1:

$$\beta_p = k_{pitch}\Delta l_1, \tag{15}$$

где

$$k_{pitch} = \frac{2 l_{01}}{\sqrt{4 r^2 a_2^2 - c_1^2}}.$$

Угол наклона платформы по отношению к горизонту в продольной плоскости (тангаж) равен

$$\beta = \beta_p + \beta_k, \tag{16}$$

где β_k – угол наклона палубы корабля по отношению к горизонту в продольной плоскости, который отражает действие внешних волновых возмущений.

В соответствии с рис. 2, *б* можно получить аналогичные расчетные соотношения для угла крена α_p стабилизированной платформы. В результате линеаризованная математическая модель для угла крена стабилизированной платформы имеет следующий вид:

$$\alpha_p = k_{roll}\Delta l_2, \tag{17}$$

где $k_{roll} = \dfrac{2l_{02}}{\sqrt{4r_1^2 b_2^2 - c_2^2}}$, $c_2 = b_2^2 + r_1^2 - l_{02}^2$, $r_1 = \sqrt{h_0^2 + b_1^2}$, $l_2 = l_{02} + \Delta l_2$, Δl_2 есть величина перемещения штока в цилиндре электро-гидравлического сервопривода, а величина l_{02} соответствует выполнению требования $\alpha_p = 0$.

Угол наклона платформы по отношению к горизонту в поперечной плоскости (крен) равен

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_k, \tag{18}$$

где α_k – угол наклона палубы корабля по отношению к горизонту в поперечной плоскости, который отражает действие внешних волновых возмущений.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА

В качестве исполнительных механизмов для управления положением стабилизированной платформы могут быть использованы системы электромагнитного подвеса и двигатели постоянного тока. В то же время в условиях большой величины массы платформы и установленного на платформе оборудования наиболее эффективным является применение электрогидравлических приводов, которые позволяют обеспечить формирование требуемой величины силы для компенсации возмущений от волновых колебаний палубы корабля.

Рассматривая математическую модель электрогидравлического привода, будем полагать, что взаимосвязь положения золотника сервоклапана x_v [м] с величиной входного тока $u = i_v$ [мА] моментного двигателя можно описать дифференциальным уравнением

$$\tau_v \dot{x}_v = -x_v + k_v u, \tag{19}$$

где τ_v – постоянная времени; k_v – коэффициент усиления электромеханизма золотникового сервоклапана. Величина расхода Q_1 рабочей жидкости гидроцилиндра зависит от смещения золотникового клапана x_v и давления рабочей жидкости P_h [21–23]:

$$Q_1 = C_d \omega x_v \sqrt{\frac{P_s - \mathrm{sgn}(x_v)P_h}{\rho}}, \tag{20}$$

где Q_1 – расход рабочей жидкости гидроцилиндра [м^3/с]; C_d – коэффициент расхода; $\omega = \dfrac{\partial S}{\partial x_v}$ – градиент площади золотника сервоклапана; P_s – давление на входе гидроцилиндра [н/м^2]; $P_h = P_A - P_B$ – перепад давления между полостями гидроцилиндра [н/м^2]; ρ – плотность масла в гидроцилиндре [кг/м^3].

Линеаризация уравнения (20) при малых отклонениях золотника от нулевого положения позволяет получить следующее выражение для величины расхода Q_1 рабочей жидкости гидроцилиндра [22, 23]:

$$Q_1 = K_q x_v - K_c P_h, \tag{21}$$

где $K_q = \dfrac{\partial Q_1}{\partial x_v}$, $K_c = -\dfrac{\partial Q_1}{\partial P_h}$, C_d – коэффициент расхода; K_q и K_c – коэффициент усиления потока/открытия и коэффициент усиления потока/давления соответственно.

Пренебрегая эффектами внешней утечки рабочей жидкости в гидроцилиндре, можно описать динамику привода:

$$Q_1 = A_h \dot{X}_h + \frac{V_h \dot{P}_h}{4E_h} + C_{hl} P_h, \tag{22}$$

где A_h – площадь поршня; V_h – объем камеры поршня; E_h – эффективный объемный модуль; X_h – перемещение штока; C_{hl} – общий коэффициент утечки. Согласно принципу баланса сил динамику перемещения штока гидроцилиндра можно описать уравнением

$$A_h P_h = m\ddot{X}_h + B_h \dot{X}_h + F, \tag{23}$$

где m – масса поршня и платформы; B_h – совокупный коэффициент смоделированных сил демпфирования и вязкого трения; F – сила внешней нагрузки, которая действует на поршень.

Обозначим $X_1 = X_h$; $X_2 = \dot{X}_h$; $X_4 = x_v$. В соответствии с уравнениями (19) – (23) представим математическую модель гидропривода в виде следующей структурной схемы (рис. 3).

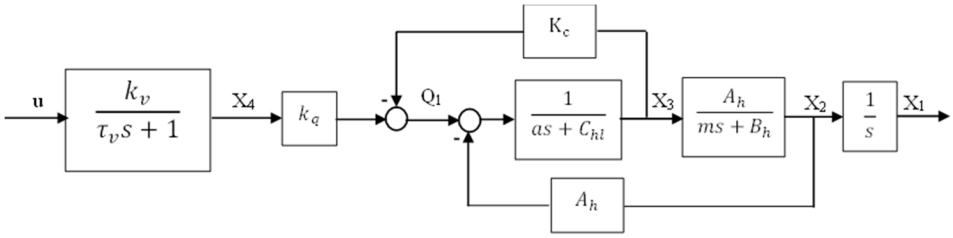


Рис. 3. Структурная схема математической модели электрогидравлического привода

Fig. 3. Block diagram of the mathematical model of the electrohydraulic drive

На рисунке $\tau_1 = \tau_v$, коэффициент a на данной структурной схеме равен следующей величине: $a = V_h / 4E_h$.

Из структурной системы на рис. 3 получим передаточную функцию электрогидропривода:

$$W(s)=\frac{x_1(s)}{u(s)}=\frac{b_0}{s(\tau_1 s+1)\left(\tau_2^2 s^2+2d\tau_2 s+1\right)}, \tag{24}$$

где

$$b_0=\frac{k_v K_q A_h}{B_h C_{hl}+K_c B_h+A_h^2};$$

$$\tau_2=\sqrt{\frac{ma}{B_h C_{hl}+K_c B_h+A_h^2}};$$

$$d=\frac{mC_{hl}+mK_c+aB_h}{2\tau_2\left(B_h C_{hl}+K_c B_h+A_h^2\right)}.$$

В настоящей работе рассматривается модель электрогидропривода, параметры которого приведены в таблице [21].

Параметры электрогидропривода

Electrohydraulic drive parameters

№ п/п	Параметры	Обозначение	Количество
1	Масса поршня и нагрузки	m	500 кг
2	Площадь поршня	A_h	$(1.47 \cdot 10^{-3})$ м^2
3	Постоянная времени сервоклапана	τ_v	0.001 с
4	Коэффициент усиления сервоклапана	k_v	$(3.04 \cdot 10^{-3})$ м/А
5	Общий коэффициент утечки	C_{hl}	$(1 \cdot 10^{-11})$ м^3/с/Па
6	Совокупный коэффициент смоделированных сил демпфирования и вязкого трения	B_h	$(1 \cdot 10^4)$ н с/м
7	Объем камеры цилиндра	V_h	$(1.47 \cdot 10^{-4})$ м^3
8	Эффективный объемный модуль	E_h	$(8 \cdot 10^8)$ Па
9	Коэффициент усиления потока / открытия	K_q	2.7 м^2/с
10	Усиление потока / давления	K_c	$(1.75 \cdot 10^{-11})$ м^3/с/Па

На основе заданных в таблице параметров электрогидропривода получим следующие значения параметров передаточной функции (24):

$$\tau_1=0.001\text{ с},\quad \tau_2=\ 0.0031\,c,\quad b_0=5.3366,\quad d=0.9498.$$

Отметим, что обычно основную составляющую волнового возмущения, например, по тангажу можно представить в виде гармонического воздействия:

$$\beta_\kappa(t) = A_{\beta_k} \sin(\omega_k t + \varphi_k),$$

где ω_k – частота колебания палубы корабля под воздействием волновых возмущений и ветра. Поэтому при значениях $\omega_k \ll \tau_1^{-1}$, $\omega_k \ll \tau_2^{-1}$ можно от математической модели вида (24) перейти к упрощенной математической модели электрогидропривода следующего вида:

$$W(s) = \frac{x_1(s)}{u(s)} = \frac{b_0}{s}.$$

В рассматриваемой кинематической схеме стабилизированной платформы используются два электрогидропривода. Перемещением штока $\Delta l_1 = x_1$ первого привода изменяется угол наклона платформы по отношению к горизонту в продольной плоскости (тангаж), а перемещением поршня $\Delta l_2 = x_1$ второго привода изменяется угол наклона платформы по отношению к горизонту в поперечной плоскости (крен). Полученные соотношения (15)–(18) и (24) позволяют описать взаимосвязь тангажа и крена стабилизированной платформы с параметрами кинематической схемы платформы и параметрами электрогидропривода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе получена математическая модель стабилизированной платформы с двумя степенями свободы, которая размещается на корабле. Рассмотрена математическая модель электрогидропривода. Приведены оценки величин параметров модели электрогидропривода. Полученная математическая модель может быть использована при решении задачи синтеза системы стабилизации углового положения платформы на корабле в условиях действия волновых возмущений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dynamics, and modeling of ocean waves / G.J. Komen, L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, P.A.E.M. Janssen. – Cambridge University Press, 1996. – 554 p.

2. A review of short-term prediction techniques for ship motions in seaway / L.M. Huang, W.Y. Duan, Y. Han, Y.S. Chen // Journal of Ship Mechanics. – 2014. – Vol. 18, N 12. – P. 1534–1542.

3. *Zhao X., Xu R., Kwan C.* Ship-motion prediction: algorithms and simulation results // Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics IEEE. – Rockville, MD, 2004. – Vol. 5. – P. V-125.

4. *Devi N.R., Banik A.K., Barik M.* Dynamic response, and control nonlinear coupled roll-pitch (2DOF) motion of the ship under harmonic waves // International Conference on Advances in Construction Materials and Structures (ACMS-2018). – IIT Roorkee, Uttarakhand, India, 2018.

5. *Gu J.Y.* Nonlinear rolling motion of ship in random beam seas // International Conference on Advances in Construction Materials and Structures (ACMS-2018). – IIT Roorkee, Uttarakhand, India, 2018.

6. Active disturbance rejection control for gun control of unmanned turret / L. Ye, Y. Xia, M. Fu, C. Li // Control Theory and Applications. – 2014. – Vol. 31, N 11. – P. 1580–1588.

7. *Habib A.A.A.A, Ali A.E.M, Nawar M.A.M.* Simple computational platform of ship stability for engineering education // 3rd IUGRC International Undergraduate Research Conference, Military Technical College. – Cairo, Egypt, 2018.

8. Development of a parallel-series stabilized platform system / L.L. Wang, J.Z. Xiao, H.R. Wang, X.L. Liu, Z. Gao // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 319. – P. 414–418.

9. *Ericson R.W., Dragen M.* Inertially stabilized platform technology concepts and principles // IEEE Control Systems Magazine. – 2008. – Vol. 28, N 1. – P. 26–46.

10. Kinematics, dynamics and control of a stabilized platform with 6-RUS parellel mechanism / E.Z. Zhao, H.N. Yu, J. Zhang, J.T. Yang, T.S. Zhao // International Journal of Robotics and Automation. – 2017. – Vol. 32, N 3. – P. 283–290.

11. *Masten M.K.* Inertially stabilized platforms for optical imaging – systems tracking dynamic targets with mobile sensors // IEEE Control Systems Magazine. – 2008. – Vol. 28, N 1. – P. 26–46.

12. *Barman S.D., Hussain A., Ahmed T.* Speed control of DC motor using PWM technique: Pulse width modulated DC motor control. – LAP Academic Publishing, 2012. – 56 p.

13. *Kılıç Z.* Design and control of a 2 DOF stabilizer: Thesis (M.S.). – Middle East Technical University, 2019. – 385 p.

14. *Гупалов В.И., Подгорная Л.Н., Ткаченко А.Н.* Стабилизированные платформы. – СПб.: ЛЭТИ, 2012. – 53 с.

15. *Батанов А.Ф., Хаханов Ю.А.* Малогабаритные многоосные высокоточные стабилизированные платформы для отработки новых технологий в условиях микрогравитации // Научное значение трудов К.Э. Циолковского: история и современность: материалы 55-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковскогою – Калуга, 2020. – Ч. 2. – С. 80–82.

16. *Sushchenko O.* Robust control of inertially stabilized platforms for ground vehicles on the basis H_∞ synthesis // Proceedings of National Aviation University. – 2016. – N 3 (68). – P. 24–34.

17. *Hilkert J.M.* Inertially stabilized platform technology // IEEE Control Systems Magazine. – 2008. – Vol. 26, N 1. – P. 26–46.

18. *William S.C., Weber H.I.* Dynamic modeling of a 2-dof parallel electrohydraulic – actuated homokinetic platform // Mechanism and Machine Theory. – 2017. – Vol. 118. – P. 1–13.

19. *Devi N.R., Banik A.K., Barik M.* Dynamic response and control nonlinear coupled roll-pitch (2DOF) motion of ship under harmonic waves // International Conference on Advances in Construction Materials and Structures (ACMS-2018). – IIT Roorkee, Uttarakhand, India, 2018.

20. Математический анализ: примеры и задачи / Н.Г. Афендикова, И.Н. Омельченко, Г.В. Рыжаков, А.Ф. Салимова. – Военный учебно-научный центр ВВС, 2011.

21. Adaptive decoupling synchronous control of dissimilar redundant actuation system for large civil aircraft / C. Shi, X. Wang, S. Wang, J. Wang, M.M. Tomovic // Aerospace Science and Technology. – 2015. – Vol. 47. – P. 114–124.

22. *Yao J., Deng W.* Active disturbance rejection adaptive control of hydraulic servo systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2017. – Vol. 64, N 10. – P. 8023–8032. – DOI: 10.1109/TIE.2017.2694382.

23. Study of electro-hydraulic force servo control system based on fuzzy control / J.Y. Li, J.P. Shao, Z.W. Wang, B. Wu, G.H. Han // IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems. – Shanghai, 2009. – P. 688–693. – DOI: 10.1109/ICICISYS.2009.5358308.

Буй Ван Там, аспирант кафедры автоматики НГТУ. В 2006 г. окончил Военно-морскую академию в Нячанге. Получил степень M.S. (магистра) в области кибернетики и автоматизации в Военно-технической академии, Ханой, Вьетнам в 2014 г. С 2015 по 2019 г. участвовал в исследованиях Военно-морской академии Вьетнама. С 2009 г. преподавал в Военно-морской академии Вьетнама. Научные интересы: математические модели динамических систем; анализ качества переходных процессов в системах автоматического управления; методы синтеза регуляторов для стабилизированных платформ на кораблях. E-mail: tamtlptt@gmail.com

Bui Van Tam is a PhD student at the NSTU Department of Automation. He graduated from the Naval Academy in Nha Trang in 2006 and obtained his M.S. (Master of Science) degree in Cybernetics and Automation from the Military Technical Academy, Hanoi, Vietnam in 2014. From 2015 to 2019. He participated in research at the Vietnam Naval Academy. Since 2009 he has been teaching at the Vietnam Naval Academy. His research interests include mathematically descriptive objects, automatic control system quality survey, and synthesizing controllers for objects on ships. E-mail: tamtlptt@gmail.com

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-7-18

A mathematical model of a stabilized platform with an electro-hydraulic drive on a ship *

T.V. BUI

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx, 630073, Russian Federation

tamtlpt@gmail.com

Abstract

Stabilized platforms are used on all types of moving vehicles, from satellites to submarines, and are even used on some portable and terrestrial devices. For example, a stabilized platform on a ship is used to accommodate navigation equipment and antennas of radar communication systems, which improves the efficiency of this equipment under the influence of wave disturbances. There are various kinematic schemes for building ship stabilized platforms. In particular, serial stabilized platforms and parallel stabilized platforms are used. In practical applications, serial stabilized platforms have found wider use. In this paper, we consider a mathematical model of a ship-based stabilized platform with two degrees of freedom, where the angular orientation of the platform is controlled using electric hydraulic drives. The use of electro-hydraulic drives makes it possible to ensure the formation of the required magnitude of the force effect to compensate for disturbances from wave oscillations of the ship's deck. In order to obtain relations for describing the relationship between the angular displacements of the elements of the kinematic scheme of the platform and the displacement of the hydraulic cylinder rod, the apparatus of complex numbers is involved in this work. A mathematical model of an electrohydraulic drive is considered taking into account the dynamics of movement of the electromechanism of a spool servo valve, the flow rates and pressures of the working fluid in the cavities of the hydraulic cylinder. A linearized mathematical model of an electrohydraulic drive is considered, and estimates are obtained for the parameters of the obtained mathematical model for given mass-dimensional characteristics of an electrohydraulic drive. This mathematical model can be used in the synthesis of an electric hydraulic drive control system to provide a given angular orientation of the platform under the action of wave disturbances.

Keywords: Stabilized platform, kinematic scheme, angular stabilization, roll stabilization, pitch stabilization, wave disturbances, electrohydraulic drive, electrohydraulic drive mathematical model, linearized mathematical model, electrohydraulic drive model parameters

REFERENCES

1. Komen G.J., Cavalert L., Donelan M., Haselmann K., Haselmann S., Jansen P.A.E.M. *Dynamics, and modeling of ocean waves*. Cambridge University Press, 1996. 554 p.

2. Huang L.M., Duan W.Y., Han Y., Chen Y.S. A review of short-term prediction techniques for ship motions in seaway. *Journal of Ship Mechanics*, 2014, vol. 18, no. 12, pp. 1534–1542.

3. Zhao X., Xu R., Kwan C. Ship-motion prediction: algorithms and simulation results. *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics IEEE*, Rockville, MD, 2004, vol. 5, p. V-125.

4. Devi N.R., Banik A.K., Barik M. Dynamic response, and control nonlinear coupled roll-pitch (2 DOF) motion of the ship under harmonic waves. *International Conference on Advances in Construction Materials and structures (ACMS-2018)*, IIT Roorkee, Uttarakhand, India, 2018.

5. Gu J.Y. Nonlinear rolling motion of ship in random beam seas. *International Conference on Advances in Construction Materials and Structures (ACMS-2018)*, IIT Roorkee, Uttarakhand, India, 2018.

6. Ye L., Xia Y., Fu M., Li C. Active disturbance rejection control for gun control of unmanned turret. *Control Theory and Applications*, 2014, vol. 31, no. 11, pp. 1580–1588.

7. Habib A.A.A.A, Ali A.E.M, Nawar M.A.M. Simple computational platform of ship stability for engineering education. *3rd IUGRC International Undergraduate Research Conference*, Military Technical College, Cairo, Egypt, 2018.

* *Received 19 February 2023.*

8. Wang L.L., Xiao J.Z., Wang H.R., Liu X.L., Gao Z. Development of a parallel-series stabilized platform system. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 319, pp. 414–418.

9. Ericson R.W., Dragen M. Inertially stabilized platform technology concepts and principles. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, vol. 28, no. 1, pp. 26–46.

10. Zhao E.Z., Yu H.N., Zhang J., Yang J.T., Zhao T.S. Kinematics, dynamics and control of a stabilized platform with 6-RUS parallel mechanism. *International Journal of Robotics and Automation*, 2017, vol. 32, no. 3, pp. 283–290.

11. Masten M.K. Inertially stabilized platforms for optical imaging – systems tracking dynamic targets with mobile sensors. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, vol. 28, no. 1, pp. 26–46.

12. Barman S.D., Hussain A., Ahmed T. *Speed control of DC motor using PWM technique: Pulse width modulated DC motor control*. LAP Academic Publishing, 2012. 56 p.

13. Kılıç Z. *Design and control of a 2 DOF stabilizer*: Thesis (M.S.). Middle East Technical University, 2019. 385 p.

14. Gupalov V.I., Podgornaya L.N., Tkachenko A.N. *Stabilizirovannye platformy* [Stabilised platforms]. St. Petersburg, LETI Publ., 2012. 53 p.

15. Batanov A.F., Khakhanov Yu.A. [Small-sized multi-axis high-precision stabilized platforms for testing new technologies in microgravity]. *Nauchnoe znachenie trudov K.E. Tsiolkovskogo: istoriya i* sovremennost' [The scientific importance of K.E. Tsiolkovsky works: history and modernity]. Proceedings of the 55th Scientific Readings in Memory of K.E. Tsiolkovsky. Kaluga, 2020, pt. 2, pp. 80–82. (In Russian).

16. Sushchenko O. Robust control of inertially stabilized platforms for ground vehicles on the basis H_∞ synthesis. *Proceedings of National Aviation University*, 2016, no. 3 (68), pp. 24–34.

17. Hilkert J.M. Inertially stabilized platform technology. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, vol. 26, no. 1, pp. 26–46.

18. William S.C., Weber H.I. Dynamic modeling of a 2-dof parallel electrohydraulic – actuated homokinetic platform. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, vol. 118, pp. 1–13.

19. Devi N.R., Banik A.K., Barik M. Dynamic response and control nonlinear coupled roll-pitch (2DOF) motion of ship under harmonic waves. *International Conference on Advances in Construction Materials and Structures (ACMS-2018)*, IIT Roorkee, Uttarakhand, India, 2018.

20. Afendikova N.G., Omel'chenko I.N., Ryzhakov G.V., Salimova A.F. *Matematicheskii analiz: primery i zadachi* [Mathematical analysis. Examples and problems]. Military training manual BBC Publ., 2011.

21. Shi C., Wang X., Wang S., Wang J., Tomovic M.M. Adaptive decoupling synchronous control of dissimilar redundant actuation system for large civil aircraft. *Aerospace Science and Technology*, 2015, vol. 47, pp. 114–124.

22. Yao J., Deng W. Active disturbance rejection adaptive control of hydraulic servo systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, vol. 64, no. 10, pp. 8023–8032. DOI: 10.1109/TIE.2017.2694382.

23. Li J.Y., Shao J.P., Wang Z.W., Wu B., Han G.H. Study of electro-hydraulic force servo control system based on fuzzy control. *IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, Shanghai, 2009, pp. 688–693. DOI: 10.1109/ICICISYS.2009.5358308.

Для цитирования:

Буй Т.В. Математическая модель стабилизированной платформы с электрогидроприводом на корабле // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 3 (91). – С. 7–18. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-7-18.

For citation:

Bui T.V. Matematicheskaya model' stabilizirovannoi platformy s elektrogidroprivodom na korable [A mathematical model of a stabilized platform with an electro-hydraulic drive on a ship]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 3 (91), pp. 7–18. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-7-18.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 91, № 3, 2023, с. 19–36

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 91, No. 3, 2023, pp. 19–36

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 81.25

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-19-36

Задача о беспорядках*

Ю.Д. ГРИГОРЬЕВ

197376, РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, Санкт- Петербургский государственный электротехнический университет

yuri_grigoriev@mail.ru

Рассматривается задача характеризации симметричных ожерелий как беспорядков. Данный подход является альтернативным подходу, использующему теорему перечисления Пойа, в том числе лемму Бернсайда. Показана связь между разбиениями чисел и типами перестановок. Типам ожерелий как перестановок сопоставляются беспорядки, в которых ни один элемент не остается на месте, а также беспорядки с неподвижными элементами. Исследуются распределения беспорядков по типам для ожерелий до седьмой степени включительно. Осуществляется подсчет и перечисление беспорядков каждого типа и устанавливается их четность.

Отдельное внимание уделено исследованию свойств симметричных ожерелий. Для каждого типа ожерелий перечисляются их классы симметрий и асимметрий. Одновременно вводятся понятия хиральной и ахиральной симметрии как разновидностей осевой симметрии. Формулируются утверждения, связывающие мощность классов симметрий с порядком симметрии ожерелий. Вводится понятие диаграмм симметрии ожерелий, уставливающих свойства инвариантности симметричных и несимметричных ожерелий заданной длины. В качестве отношения эквивалентности ожерелий используется отношение конгруэнтности, позволяющее использовать геометрический подход к исследованию ожерелий и визуализации получаемых результатов. Для этого ожерельям сопоставляются многосвязные неориентируемые графы, вершинами которых являются вершины правильных многоугольников. При этом соответствии число вершин графа равно длине ожерелья, а количество компонент связности совпадает с количеством цветов бусин.

В качестве приложения полученных результов рассматривается возможность исследования с помощью ожерелий акцентной динамики стихотворных строф по вертикали. Приведены эмпирические данные по использованию различных типов семистиший в стихотворной практике. Отмечено, что приблизительно четверть из числа существующих симметричных типов ожерелий по различным причинам не находят реального применения.

Ключевые слова: перестановка, ожерелье, симметрия, ахиральность, хиральность, функция разбиения, беспорядок, диаграмма симметрий

* *Статья получена 24 апреля 2023 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Ожерелья представляют сложную алгебраическую структуру, требующую для исследования широкого арсенала математических средств, включая методы комбинаторного анализа, теории графов, теории групп [1], теории разбиений [2] и т. д. Задача об ожерельях хорошо известна в перечислительной комбинаторике, а ее решение в стандартной постановке осуществляется использованием теоремы перечисления Пойа, в том числе ее следствия – леммы Бернсайда.

В расширенном аспекте под задачей об ожерельях будем понимать задачу перечисления не всех, а только симметричных ожерелий, так как именно они часто представляют особый интерес во многих прикладных областях, например, в стиховедении. Аналогичные постановки задачи перечисления симметричных структур возникают в физике, филлотаксисе, компьютерной химии, кристаллографии, стилеметрии, математическом стиховедении и многих других смежных областях. Своими корнями эти постановки задач уходят в общую теорию симметрий, устанавливающую (Ф. Клейн), в частности, связь между группами перестановок и симметриями выпуклых многогранников. Настоящая работа посвящена рассмотрению симметричных плоских структур, подпадающих под определение ожерелий, с позиций задачи о беспорядках.

Помимо изложения алгоритмического подхода к задаче перечисления симметричных ожерелий в статье рассматривается приложение задачи о беспорядках к задаче из области математического стиховедения, связанной с перечислением схем рифмовки в семистишных строфах.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Будем рассматривать задачу об ожерельях с помощью подхода, основанного на интерпретации ожерелий как перестановок. В этом случае каждому ожерелью сопоставляется граф с числом вершин, равным степени перестановки, т. е. длине ожерелья. Граф перестановки распадается на отдельные компоненты, т. е. является несвязным. Каждая из компонент является циклом. Граф перестановки ожерельем не является, так как его вершины не раскрашены.

Ожерелье называется *симметричным*, если его граф, представленный вершинами правильного n-угольника и инцидентными им ребрами, как геометрическая фигура обладает хотя бы одной осевой симметрией. Более точные определения симметричности ожерелий приводятся в разделе 2. Поскольку алгебраических и геометрических критериев симметричности не существует, в статье ставится задача перечисления симметричных ожерелий алгоритмическим способом.

Пусть T – множество ожерелий заданной длины n. Смысл перехода от задачи об ожерельях [1, с. 212] к задаче о беспорядках заключается в исключении из алгоритма поиска симметричных ожерелий трудоемкого в смысле временных затрат шага распределения ожерелий $x \in T$ по орбитам. Этот шаг заменяется на перечисление перестановок определенного типа, отвечающих заданному ожерелью. Множество таких перестановок образует класс сопряженных элементов симметрической группы S_n, которая хорошо изучена и для которой в ряде случаев имеется множество полезных результатов. Второй шаг

алгоритма заключается в выделении в полученном классе сопряженности тех перестановок, которые отвечают симметричным ожерельям.

В задаче об ожерельях циклическая группа Z_n действует на множество ожерелий *T*, на котором определено отношение эквивалентности (в нашем случае отношение конгруэнтности). Действие Z_n на *T* разбивает *T* на блоки, называемые орбитами $\mathrm{Orb}(T, Z_n)$ группы Z_n. В задаче о беспорядках ожерелий нет, а есть перестановки $\pi \in S_n$, преобразующие множество $N_n = \{1, 2, ,..., n\}$. Здесь $T = N_n$. В этом случае говорят об орбитах $\mathrm{Orb}(a, \pi)$ элементов $a \in N_n$, порождаемых действием симметрий $\pi \in S_n$. Каждой перестановке $\pi \in S_n$ сопоставляется граф, который образуют несовпадающие орбиты $\mathrm{Orb}(a, \pi)$. В статье графы преобразований и орбиты в этом контексте не рассматриваются.

Задача об ожерельях, состоящая в подсчете числа *n* ожерелий $x \in T$ над множеством раскрасок $Y = \{ c_1, \ldots, c_r \}$, которые можно построить по заданному *n*-мультимножеству $x = \left[c_1^{\lambda_1} \ldots c_r^{\lambda_r} \right]$, имеет достаточно простое решение. Общая формула для числа таких ожерелий имеет вид [3, с. 19]:

$$P_n(\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_r) = \frac{n!}{\lambda_1! \lambda_2! \ldots \lambda_r}, \qquad |\lambda| = \sum_{i=1}^{r} \lambda_i = n. \tag{1.1}$$

Однако интерес представляют более тонкие свойства множества *T*, которые удается обнаружить в результате действия на *T* некоторой группы симметрий *G*. В частности, это касается подсчета орбит, в том числе симметричных (орбит с симметричными ожерельями), группы *G*.

Теорема 1 (Лемма Бернсайда) [1, с. 212; 3, с. 201]. *Пусть T – множество ожерелий x, на котором действует группа симметрий G. Обозначим* N_{Orb} *– количество орбит группы G,* $\mathrm{St}(x) \subset G$ *– стабилизатор G,* $g \in G$ *– подстановка, представленная в виде произведения непересекающихся циклов,* $\alpha_k(g)$ *– число циклов длины k в подстановке* $g \in G$. *Имеют место равенства*:

$$N_{Orb} = \frac{1}{|G|} \sum_{x \in T} |\mathrm{St}(x)| = \frac{1}{|G|} \sum_{x \in G} \alpha_1(g). \tag{1.2}$$

Лемма Бернсайда (1.2) поставленную в статье задачу перечисления симметричных ожерелий не решает. Именно поэтому, за исключением отдельных случаев [4, 5], эту задачу необходимо решать алгоритмически. Однако универсального алгоритма перечисления симметричных ожерелий даже на основе предлагаемого подхода также не существует. В рассматриваемой статье решается задача перечисления симметричных ожерелий длиной $n \le 7$ и отмечаются некоторые особенности таких задач перечисления в общем случае.

2. СИММЕТРИЧНЫЕ ОЖЕРЕЛЬЯ

Нас будут интересовать симметричные ожерелья с точки зрения их подсчета и перечисления. Эта задача решается с использованием алгоритмического подхода.

2.1. РАЗБИЕНИЯ ЧИСЕЛ И ОЖЕРЕЛЬЯ

Существуют различные эквивалентные определения ожерелий. В теории графов под ожерельем понимается помеченный *r*-связный (p, q)-граф Г, каждая компонента которого либо $(2,1)$-граф (2-цикл), либо простой *m*-цикл $(m \geq 3)$ с $(m \times m)$-матрицей смежностей

$$B_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } |i-j| = 1 \text{ или } |i-j| = m-1, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \tag{2.1}$$

В комбинаторике *r*-цветное ожерелье длиной *n* – это класс эквивалентности *n*-символьных строк над алфавитом размером *r*, где эквивалентными считаются строки, получаемые друг из друга *циклическим сдвигом*.

В геометрии под n-ожерельем понимают фигуру, образованную *r*-циклами с вершинами одного цвета, совпадающими с вершинами правильного *n*-угольника. Визуально ожерелье можно представить как структуру из *n* связанных в кольцо r бусин разных цветов, т. е. цвета́ бусин соответствуют r символам алфавита. Отношением эквивалентности ожерелий в этом случае является отношение конгруэнтности, при котором два ожерелья эквивалентны, если их графы совпадают при некотором движении. В нашем случае в качестве такого движения рассматриваются вращения, т. е. изометрические преобразования в R^2, эквивалентные циклическому сдвигу *n*-символьных строк.

Ожерелья можно интерпретировать как *разбиения* натурального числа n на r слагаемых $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_r$, располагаемых в порядке их невозрастания (неубывания). Числа λ_i называются *частями* разбиения. Разбиение $\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_r$ числа *n* обозначаем $\lambda \vdash n$. Если дано разбиение $\lambda \vdash n$, то запись $\left[1^{s_1} 2^{s_2} \ldots r^{s_r}\right]$ означает, что в разбиении $\lambda \vdash n$ имеется ровно s_1 слагаемых, равных единице, s_2 слагаемых, равных двум, и т. д.:

$$\sum_{i=1}^{r} i^{s_i} = \sum_{i=1}^{r} \lambda_i = |\lambda| = n. \tag{2.2}$$

Таким образом, с точностью до обозначений разбиение $\lambda = \left[1^{s_1} 2^{s_2} \ldots r^{s_r}\right]$ интерпретируется как ожерелье $x = \left[c_1^{\alpha_1} \ldots c_r^{\alpha_r}\right]$.

Существуют различные виды разбиений. Обозначим через $p(n)$ *функцию разбиения*, которая определяется как число всех неупорядоченных разбиений числа *n* [2, с. 15]. Через Q обозначим множество всех разбиений, через I – множество разбиений, не содержащих единичные части, через D – множество разбиений с попарно различными частями. Функцию разбиения в зависимости от того, на каком множестве она определена, обозначим $p(Q,n)$, $p(I,n)$ и $p(D,n)$ соответственно. Возможны также разбиения со всеми четными или нечетными частями, как с совпадающими, так и попарно не совпадающими частями. Ограничимся следующей цепочкой вложений множеств:

$$D \subseteq S \subset I \subset Q.$$

Совокупность циклов, определяющих $\left[c_1^{\alpha_1}\ldots c_r^{\alpha_r}\right]$-ожерелье, задает некоторую перестановку чисел над N_n. В зависимости от направлений обхода и порядка обхода вершин циклов одному $\left[c_1^{\alpha_1}\ldots c_r^{\alpha_r}\right]$-ожерелью сопоставляется несколько перестановок. Поэтому число перестановок степени *n* всегда больше числа *n*-ожерелий типа $\left[c_1^{\alpha_1}\ldots c_r^{\alpha_r}\right]$, см. (1.1).

2.2. СИММЕТРИЧНЫЕ ОЖЕРЕЛЬЯ

Пусть G – группа симметрий, T – множество ожерелий. Ожерелье $x\in T$ называется *симметричным*, если существует элемент $g\in G$, $g\neq e$, такой что $gx=x$ [6]. Возможны также другие эквивалентные определения симметрий. Метризуем множество *T*. Пусть $d(x,y)$ – расстояние Хэмминга [7, с. 52], определяемое как число несовпадений $x_i\neq y_i$ координат ожерелий $x=(x_i)$, $y=(y_i)$, принадлежащих $T\subset N_n$. Данное расстояние используется для строк одинаковой длины любых *r*-ичных алфавитов. Ожерелье $x\in T$ симметрично тогда и только тогда, когда существует элемент $g\in G$, $g\neq e$, такой что $d(gx,x)=0$ [6]. В связи с этим элементы $g\in G$ называются симметриями. Так как ожерелья будем соотносить с плоским графом, то далее зеркальную и осевую симметрии ожерелья рассматриваем как синонимы.

Согласно Кельвину, ожерелье $x\in T$ (или, что эквивалентно, соответствующая ему конфигурация Г) называется *хиральным*, если оно не совпадает со своим зеркальным отражением при вращениях и сдвигах. Ожерелье $x\in T$ называется *ахиральным*, если его зеркальное отражение $\varphi(x)$ при повороте σ на угол 180° совпадает с исходным, т. е. $(\sigma\circ\varphi)x=x$. Хиральное ожерелье $x\in T$ и его зеркальное отражение $y=\varphi(x)$ образуют энантиомерную пару (x, y), элементы которой называются *энантиомерами*. Для ахиральных ожерелий энантиомеры совпадают.

Пусть k – порядок симметрии (это означает наличие у конфигурации k однотипных осей симметрии). Будем использовать обозначения: $[k,0]$ – осевая симметрия, $[k,k]$ – ахиральная симметрия, $[0,k]$ – хиральная симметрия. Любая симметрия правильного многоугольника переставляет его вершины, т. е. задает перестановку множества его вершин. Например, в случае правильного треугольника так получаются все 6 перестановок его вершин (тождественная, два поворота на 120° и три осевые симметрии), а в случае квадрата или правильного пятиугольника – уже не все [8, с. 28]. В любом случае всякое *n*-ожерелье задается перестановкой степени *n*, разложенной на *r* циклов. Задача заключается в том, чтобы, рассматривая ожерелья как перестановки, выделить среди них симметричные и перечислить классы конгруэнтности симметричных $\left[c_1^{\alpha_1}\ldots c_r^{\alpha_r}\right]$-ожерелий. Это связано с тем, что все конфигурации, представляющие класс симметричных $\left[c_1^{\alpha_1}\ldots c_r^{\alpha_r}\right]$-ожерелий одного типа (тип соотносится с конкретным разбиением $\lambda\,|\!-n$), изоморфны как графы [1, с. 24], но не все они при этом конгруэнтны.

2.3. ЗАДАЧА О БЕСПОРЯДКАХ

Перестановку π называют *беспорядком*, если в ней ни один элемент не стоит на своем месте. Число беспорядков из n элементов обозначим через D_n. Задача о беспорядках – это подсчет и перечисление ожерелий как беспорядков с последующим ответом на вопрос, каким классам симметрии они принадлежат и какими свойствами они характеризуются.

Теорема 2 [9]. *Формула числа беспорядков в замкнутой форме имеет вид*

$$D_n = \sum_{r=0}^{n} (-1)^r C_n^r (n-r)! = n!\left(1 + \sum_{r=1}^{n} \frac{(-1)^r}{r!}\right). \qquad (2.3)$$

Обозначим $D_{n,r}$ – число беспорядков, в которых на своих местах остаются r элементов, а остальные $(n-r)$ элементов образуют беспорядок. Можно видеть, что $D_{n,n} = 1$ (все элементы остаются на своих местах), $D_{n,0} = D_n$ (ни один элемент не остается на своем месте).

Теорема 3 [9]. *Имеет место формула*

$$D_{n,r} = C_n^r D_{n-r} = \frac{n!}{r!}\left(1 - \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} - \ldots + \frac{(-1)^{n-r}}{(n-r)!}\right), \quad r = 0, 1, \ldots, n. \qquad (2.4)$$

Если для некоторых $i, j \in N_n$ в подстановке $\pi: i \to k_i$ степени n из $i < j$ следует $k_i > k_j$, то говорят, что пара (i, j) образует *инверсию*. Всякая перестановка может быть разложена в произведение циклов. Скажем, все $[2^r]$-ожерелья изначально являются разложениями в произведение циклов длиной 2. Перестановка называется четной, если число инверсий в ней четно, и наоборот. Четную перестановку π обозначим как (+1), а нечетную – как (–1). Очевидно, $\operatorname{sgn}(\pi) = (-1)^m$, где m – количество инверсий в π. В четной перестановке число беспорядков четно, а в нечетной – нечетно [8, с. 16]. Мультивектор $\left[1^{\lambda_1} 2^{\lambda_2} \ldots n^{\lambda_n}\right]$, где $\lambda_1, \ldots, \lambda_n$ – длины циклов, на которые разлагается данная перестановка степени n, называется *типом перестановки*.

Теорема 4. *Перестановки одного типа имеют одну и ту же четность.*

Доказательство. Четность перестановки определяется четностью числа транспозиций (циклов длиной 2), на которые она разлагается. Отсюда следует, что для перестановок типа $\left[c_1^{\alpha_1} \ldots c_k^{\alpha_k}\right]$ степени n ее четность определяется четностью числа $n - |\alpha|$.

3. ОСНОВНАЯ ТЕОРЕМА

Данный раздел посвящен ответу на вопрос о структуре классов симметрий перестановок симметрической группы S_n, $n = 4,\ldots,7$. Результат сформулирован в виде *основной теоремы*, доказательство которой размещено в разделах 3.1 и 3.2.

Теорема 5. (Основная теорема). *Группы* S_n *порядка* $n \le 6$ *классов асимметрий не содержат*.

Утверждение теоремы 5 высказано в [10, с. 46]. Проведем его доказательство разбором случаев для $n \le 6$ и $n = 7$.

3.1. ОЖЕРЕЛЬЯ ДЛИНОЙ $n \le 6$

Случаи $n = 2,3$ тривиальны. Пусть $n = 4$. Единственным разбиением, $\lambda \vdash 4 \in I$, помимо $[4^1]$, является $[2^2]$. Ему соответствуют три перестановки вершин квадрата (каждому циклу отвечает свой цвет бусин):

$$[1,\,1]:\ \pi_1 = (12)(34),\quad \pi_2 = (14)(23),\quad [2,\,2]:\ \pi_3 = (13)(24).$$

Так как $\pi_1 \cong \pi_2$ (знак $\cong$ означает отношение конгруэнтности), то имеем два класса симметрий: $C_1 = \{\pi_1, \pi_2\}$ и $C_2 = \{\pi_3\}$. Таким образом, $S = I$. Все перестановки разбиения $[2^2]$ – *четные* беспорядки.

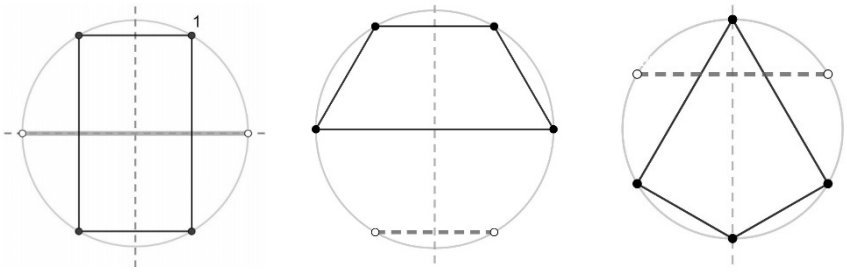
Пусть $n = 5$. Единственным разбиением $\lambda \vdash 5 \in I$ является $[3^1 2^1]$. Типу $[3^1 2^1]$ соответствуют два класса симметрий C_i, $i = 1, 2$. Действительно, в перестановках $\pi \in S_5$ возможны только два неконгруэнтных 3-цикла (125) и (134) и, следовательно, два класса симметрий с «образующими» перестановками: $\pi_1 = (125)(34)$ и $\pi_2 = (134)(25)$:

$$[1,\,0]:\ C_1 = \langle \pi_1 \rangle,\qquad C_2 = \langle \pi_2 \rangle.$$

Поскольку для выбора вершин 3-цикла существует $C_5^3 = 10$ вариантов, то $|C_1| = |C_2| = 10$, т. е. всего существует 20 симметричных $[3^1 2^1]$ перестановок. Все они являются *нечетными беспорядками*.

Пусть $n = 6$. Поскольку $p(6) = 11$, то существуют 11 разбиений $\lambda \vdash 6$. Однако $p(I, 6) = 3$, т. е. имеется только три разбиения, не содержащих единичных частей. Это разбиения $[4^1 2^1]$, $[3^2]$ и $[2^3]$. В группе S_6 им соответствует 145 беспорядков.

Тип $[4^1 2^1]$. Этому типу соответствуют 90(–1) беспорядков. Они образуют три класса симметрий C_i, $i = 1, 2, 3$, содержащих соответственно 18, 36 и 36 элементов. Графы (конфигурации) ожерелий, представляющие эти классы, показаны на рис. 1.



а *б* *в*

Рис. 1. Графы ожерелий типа $[4^1 2^1]$:

а – класс C_1, симметрия [2, 0], ожерелье aba aba; *б* – класс C_2, симметрия [1, 0], ожерелье aab baa; *в* – класс C_3, симметрия [1, 0], ожерелье aaa bab

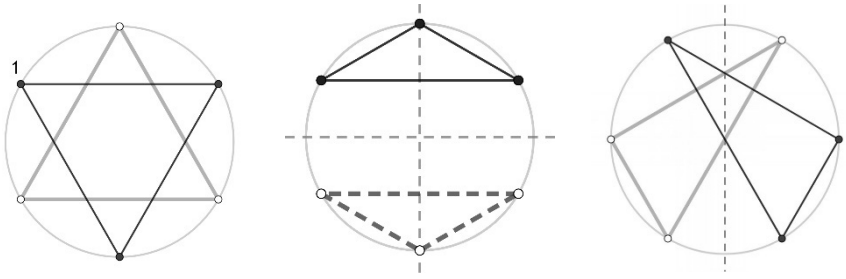
Fig. 1. Type $[4^1 2^1]$ necklace graphs:

(*a*) class C_1, symmetry [2, 0], necklace aba aba; (*b*) class C_2, symmetry [1, 0] necklace aab baa; (*c*) class C_3, symmetry [1, 0], necklace aaa bab

Утверждение 1. Пусть N – порядок симметрии $[4^1 2^1]$ ожерелий любого из их трех классов C, $|C|$ – мощность этого класса. Тогда

$$N \cdot |C| = 36. \tag{3.1}$$

Тип $[3^2]$. Этому типу соответствуют 40 (+1) беспорядков, которые образуют три класса симметрии C_i, $i = 1, 2, 3$. Графы их ожерелий показаны на рис. 2.



а *б* *в*

Рис. 2. Графы ожерелий типа $[3^2]$:

а – класс C_1, симметрия [6, 0], ожерелье aba bab; *б* – class C_2, симметрия [1, 1], ожерелье aaa bbb; *в* – class C_3, симметрия [0, 1], ожерелье abb aab

Fig. 2. Type $[3^2]$ necklace graphs:

(*a*) class C_1, symmetry [6, 0], necklace aba bab; (*b*) class C_2, symmetry [1, 1], necklace aaa bbb; (*c*) class C_3, symmetry [0, 1], necklace abb aab

Мощности классов равны $|C_1| = 4$, $|C_2| = 12$, $|C_3| = 24$. Отсюда вытекает

Утверждение 2. *Пусть N – порядок симметрии* $[3^2]$*-ожерелий какого-либо из их трех классов C,* $|C|$ *– мощность этого класса. Тогда*

$$N \cdot |C| = 24. \tag{3.2}$$

Тип $[2^3]$. Этому типу соответствуют 15(–1) беспорядков, которые образуют пять классов симметрии C_i, $i = 1, \ldots, 5$, обладающих свойствами:

$$|C_1| = 3, \quad |C_2| = 3, \quad |C_3| = 6, \quad |C_4| = 2, \quad |C_5| = 1.$$

Графы ожерелий, представляющих эти классы, показаны на рис. 3.

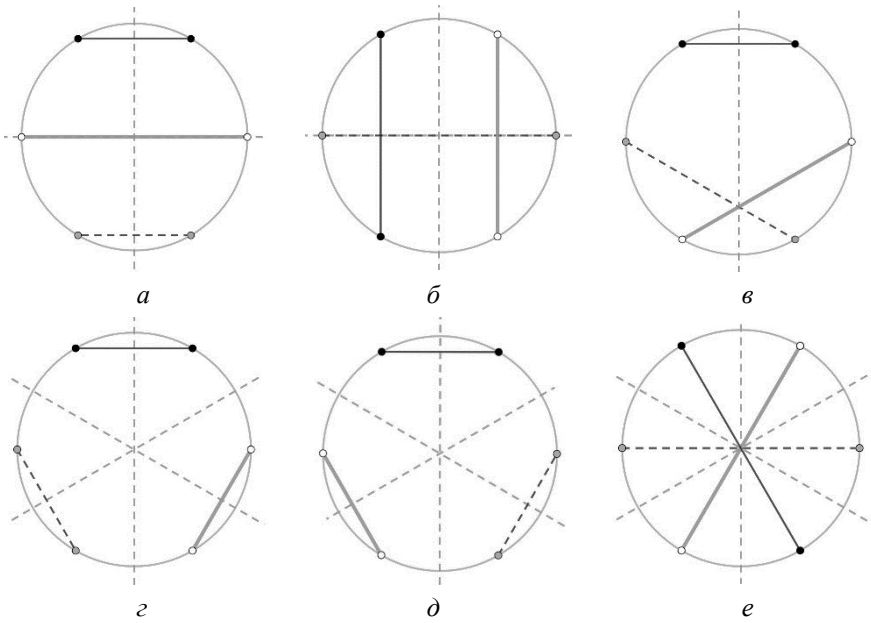


Рис. 3. Графы ожерелий типа $[2^3]$:

а – класс C_1, симметрия [1, 1], ожерелье abc cba; *б* – класс C_2, симметрия [1, 1], ожерелье abc acb; *в* – класс C_3, симметрия [0, 1], ожерелье abc bca; *г* – класс C_4, симметрия [0, 3], ожерелье abb cca; *д* – класс C_4 (энантиомер), симметрия [0, 3], ожерелье acc bba; *е* – класс C_5, симметрия [0, 3], ожерелье abc abc

Fig 3. Type $[2^3]$ necklace graphs:

(*a*) class C_1, symmetry [1, 1], necklace abc cba; (*b*) class C_2, symmetry [1, 1], necklace abc acb; (*c*) class C_3, symmetry [0, 1], necklace abc bca; (*d*) class C_4, symmetry [0, 3], ожерелье abb cca (*e*) class C_4 (enantiomer), symmetry [0, 3], necklace acc bba; (*f*) class C_5, symmetry [0, 3], necklace abc abc

Отсюда вытекает

Утверждение 3. *Пусть N – порядок симметрии* $[2^3]$*-ожерелий любого из их пяти классов C,* $|C|$ *– мощность этого класса. Тогда*

$$N \cdot |C| = 6. \tag{3.3}$$

Завершением доказательства теоремы 5 является рассмотрение ожерелий длины $n = 7$, для которых не все типы разбиения $\lambda \vdash 7 \in I$ составлены только из классов симметрии. Эта часть доказательства вынесена в раздел 3.2.

3.2. ОЖЕРЕЛЬЯ ДЛИНОЙ *n* = 7

Всего имеется $|S_7| = 5040$ перестановок 7-й степени, из них беспорядков без неподвижных точек $D_{7,0} = 1854$, с неподвижными точками – $D_{7,r} = 3186$, $r = 1,\ldots,7$. Поскольку $p(7) = 15$, то существует 15 разбиений $\lambda \vdash 7$, распределение беспорядков которых по типам представлено в табл. 1. Из нее следует, что число четных и нечетных беспорядков совпадает и равно $N = |S_7| / 2 = 2520$. Для вычислений использованы соотношения (2.3) и (2.4).

Таблица 1

Table 1

Распределение 7-беспорядков по типам: количество и четность

Distributon of 7-disorders by types: number and evenness

Число беспоряд-ков	Типы 7-беспорядков и их четность				Всего
$D_{7,0}$	$[7^1]$	$[5^1 2^1]$	$[4^1 3^1]$	$[3^1 2^2]$	1854
	720 (+1)	504(–1)	420(–1)	210(+1)	
$D_{7,1}$	$[6^1 1^1]$	$[4^1 2^1 1^1]$	$[3^2 1^1]$	$[3^1 2^2]$	1855
	840(–1)	630(+1)	280(+1)	105(–1)	
$D_{7,2}$	$[5^1 1^2]$	$[3^1 2^1 1^2]$			924
	504(+1)	420(–1)			
$D_{7,3}$	$[4^1 1^3]$	$[2^2 1^3]$			315
	210(–1)	105(+1)			
$D_{7,4}$	$[3^1 1^4]$				70
	70(+1)				
$D_{7,5}$	$[2^1 1^5]$				21
	21(–1)				
$D_{7,7}$	$[1^7]$				1
	1(+1)				
Всего					5040

Согласно табл. 1 перестановки S_7 имеют 15 типов. Известно, что количество классов сопряженности симметрической группы S_n равно количеству разбиений $p(n)$ числа n, что мы и имеем в данном случае, поскольку $p(7)=15$. Количество элементов $|C|$ в каждом цикловом классе $C=\left[1^{\alpha_1}2^{\alpha_2}\ldots n^{\alpha_n}\right]$ равно индексу централизатора $Z_{S_n}(g)$ элемента $g\in C$, т. е. $|C|=\left[S_n : Z_{S_n}(g)\right]$. Существует выражение для $|C|$ в замкнутой форме [11, 12], а именно:

$$|C|=\frac{|S_n|}{z_C}, \tag{3.4}$$

где z_C – автоморфизм диаграммы Юнга разбиения $\left[1^{\alpha_1}2^{\alpha_2}\ldots n^{\alpha_n}\right]$ для заданного класса C, вычисляемый по формуле

$$z_C=\prod_{k=1}^{n}k^{\alpha_k}\alpha_k!.$$

Например, если $C=[1^3 4^1]$, то $z_C=(1^3 3!)(4^1 4!)=24$. Следовательно, $|C|=7!/24=210$, что соответствует табл. 1.

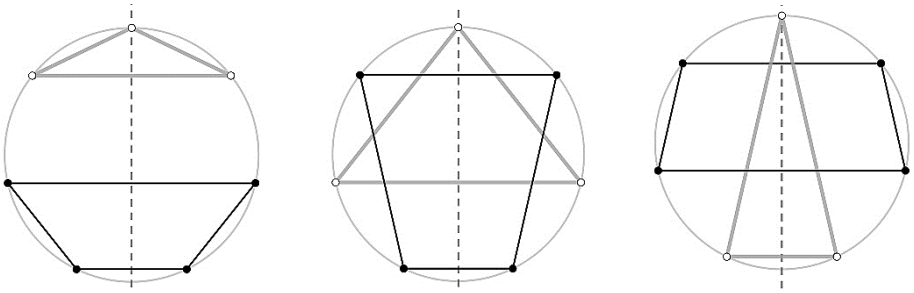
Так как $p(I,7)=3$, то какие-то из трех типов $[5^1 2^1]$, $[4^1 3^1]$ или $[3^1 2^2]$ должны содержать несимметричные ожерелья. Рассмотрим каждый из них.

Тип $[5^1 2^1]$ имеет 3 класса симметрий по 168 беспорядков в каждом [5]. Несимметричных ожерелий нет.

Тип $[4^1 3^1]$ имеет 9 классов симметрий (в них учитываются три варианта обхода вершин в 4-цикле P_4 и три возможные комбинации различных 3- и 4-циклов P_3 и P_4 в одном ожерелье) по 28 беспорядков в каждом, всего 252 беспорядка. Поясним сказанное. Рассмотрим полный граф K_4 (граф тетраэдра) [1, с. 29], в котором $n=4$ вершины и $m=6$ ребер. Чтобы разрушить в нем все циклы и получить остов графа K_4, необходимо, как минимум, удалить $\nu=m-n+1=3$ ребра (ν – цикломатическое число графа). Но мы хотим один цикл сохранить. Следовательно, удаляем только два неинцидентных друг другу ребра. Это можно сделать тремя способами, из которых выбираем только один (удаление диагоналей в K_4), что приводит к рис. 4. Это те самые три графа из возможных девяти, которые ннтерпретируют схемы рифмовок при анализе акцентной динамики стихотворных строф по вертикали.

Несимметричные беспорядки образуют 6 классов, также имеющих по 28 беспорядков, что в итоге дает 168 беспорядков. Таким образом, всего получаем 420 беспорядков.

Тип $[3^1 2^2]$ имеет 9 классов симметрии по 14 беспорядков в каждом, всего 126. Три ожерелья из девяти показаны на рис. 5. Так как 2-циклы допускают три способа взаимного расположения (смежный, перекрестный, охватный), то недостающие 6 графов легко восстанавливаются).



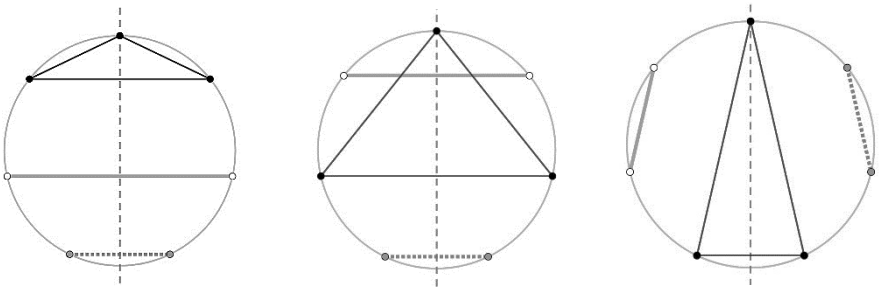
а *б* *в*

Рис. 4. Графы ожерелий типа $[4^1 3^1]$:

а – класс C_1, симметрия [1, 0]; ожерелье aaa bbbb; *б* – класс C_2, симметрия [1, 0], ожерелье aba baab; *в* – класс C_3, симметрия [1, 0], ожерелье abb aabb

Fig. 4. Type $[4^1 3^1]$ necklace graphs:

(*a*) class C_1, symmetry [1, 0], necklace aaa bbbb; (*b*) class C_2, symmetry [1, 0], necklace aba baab; (*c*) class C_3, symmetry [1, 0], necklace abb aabb



а *б* *в*

Рис. 5. Графы ожерелий типа $[3^1 2^2]$:

а – класс C_1, симметрия [1, 0], ожерелье aaa bccb; *б* – класс C_2, симметрия [1, 0], ожерелье aba bccb; *в* – класс C_3, симметрия [0, 1], ожерелье abb aacc

Fig. 5. Type $[3^1 2^2]$ necklace graphs:

(*a*) class C_1, symmetry [1, 0], necklace aaa bccb; (*b*) class C_2, symmetry [1, 0], n ecklace aba bccb; (*c*) class C_3, symmetry [0, 1], necklace abb aacc

Несимметричные ожерелья образуют 6 классов по 14 беспорядков в каждом, что дает 84 беспорядка. В итоге для этого типа имеем 210 беспорядков.

4. ДИАГРАММЫ СИММЕТРИЙ

Сопоставим графам ожерелий *диаграммы симметрий*. Для каждой компоненты графа, т. е. некоторого простого цикла, перечислим длины составляющих его ребер [13]. Суммарное количество ребер по всем циклам образует композицию [2, с. 67] – *упорядоченное разбиение* числового инварианта J на

фиксированное число слагаемых m, а именно: значение i-го элемента композиции равно количеству ребер длиной i. Сумма элементов композиции равна J.

Для $n = 4,\ldots,7$ диаграммы симметрий n-ожерелий представлены в табл. 2. Такие композиции, как хеш-функции $h = (h_1,...,h_{[n/2]})$, не определяют ожерелья однозначно, т. е. существуют одинаковые композиции, или коллизии, которым соответствуют неконгруэнтные ожерелья. Отсюда следует, что инвариант J является неполным, как и определяемый с помощью композиции h индекс Винера W [14]:

$$J = \sum_{i=1}^{[n/2]} h_i\,, \qquad W = \sum_{i=1}^{[n/2]} i h_i\,.$$

Композиции ожерелий для всех типов и классов симметрий представлены в табл. 2 (курсивом в столбцах таблицы выделены композиции несимметричных ожерелий). Таким образом, утверждение теоремы 5 доказано.

В заключение отметим, что инварианты важны при проверке изоморфизма графов и в задачах компьютерной химии. Но пока теория инвариантов графов не позволяет выделять симметричные графы из их общего перечня. В этом смысле табл. 2 – лишь небольшой фрагмент, характеризующий сложность проблемы.

Таблица 2

Table 2

Композиции *n* ожерелий, *n* = 4,…,7. Строки – количество ребер длиной 1, 2 и 3 (*J* – инвариант)

Compositions of *n* necklases, *n* = 4,…,7. Rows are number of length edges 1, 2 and 3 (*J* is an invariant)

	$n = 4$	$n = 5$	$n = 6$			$n = 7$		
	$[2^2]$	$[3^1 2^1]$	$[4^1 2^1]$	$[3^2]$	$[2^3]$	$[5^1 2^1]$	$[4^1 3^1]$	$[3^1 2^2]$
1	200	130	221	060	201	501	511	311
2	020	310	401	420	021	330	151	410
3			230	222	120	321	331	230
4					300		*322*	131
5					003		*232*	041
6							*223*	023
7								113
8								320
9								104
10								*122*
11								*212*
12								*221*
J	2	4	3	5	6	6	7	5

5. ПРИЛОЖЕНИЯ К СТИХОВЕДЕНИЮ

Конвертируем полученные результаты в терминологию стиховедения применительно к строфике, интерпретируя ожерелья как строфы стихотворений. Для этого сопоставим компонентам связности графов ожерелий схемы рифмовок, отражающие акцентную динамику строф по вертикали. Каждый цикл, связывающий вершины одной компоненты связности, обозначим соответствующей буквой. На конкретном примере проанализируем различие между задачами об ожерельях и беспорядках.

Пусть $n = 6$, ожерелье имеет тип $[2^3]$. В стиховедении это соответствует строфе из шести стихов с тремя парными рифмами. Согласно (1.1) всего имеем $P_6(2,2,2) = 90$ ожерелий, которые согласно лемме Бернсайда (1.2) для циклической групп Z_6 распределяются по 16 орбитам. С другой стороны, количество беспорядков того же типа согласно (3.4) равно 15, что существенно меньше, чем в первом случае. Это приводит к значительному снижению вычислительных затрат, так как не требует, как в первом случае, распределения 90 ожерелий по 16 орбитам. Если рассмотреть беспорядки над множеством раскрасок, а их всего будет $r! = 6$, то перестановки преобразуются в ожерелья, которых в итоге станет $15 \times 6 = 90$. Это означает, что сокращение вычислений достигается за счет того, что вершины графов перестановок не раскрашены.

Этап распределения ожерелий или беспорядков по классам конгруэнтности является общим для обеих задач и примерно одинаков по сложности. Так, например, для ожерелий типа $[2^r]$ с помощью разработанного алгоритма были получены следующие результаты относительно числа $N_{Sym}(r)$ классов симметричных ожерелий:

$$N_{Sym}(3) = 5, \quad N_{Sym}(4) = 16,$$

$$N_{Sym}(5) = 53, \quad N_{Sym}(6) = 210.$$

Полученные результаты для симметричных и несимметричных ожерелий длины $n = 7$ представлены в табл. 3.

Символом «*» в табл. 3 отмечены схемы рифмовок, обнаруженные автором в творчестве различных поэтов – от Лермонтова до Высоцкого (Анненский, Брюсов, Кузмин и др.). Скажем, симметричная схема aaa bccb – это знаменитая бородинская строфа, впервые использованная Лермонтовым в поэме «Бородино».

Отсутствие метки «*» в схеме рифмовки означает, что данная схема неупотребительна (скажем, тип $[5^1 2^1]$) или, говоря точнее, не обнаружена автором статьи. С другой стороны, можно высказать предположение, что непомеченные схемы рифмовок – это схемы, пока еще не использовавшиеся поэтами по эстетическим причинам.

Таблица 3

Table 3

Перечень классов симметрий и асимметрий семистиший

List of symmetrys and asymmetry classes of seven-line stanzas

Номер ожерелья	Тип $[5^1 2^1]$	Тип $[4^1 3^1]$		Тип $[3^1 2^2]$	
	Симметрия	Симметрия	Асимметрия	Симметрия	Асимметрия
1	aaa aabb	aaa bbbb	aaa bbab *	aaa bccb *	abc baca *
2	aaa abab	aba baab *	aaa babb *	aaa bcbc *	abc caba
3	aaa baab	aba abba *		aaa bbcc	abc baac *
4				aba bccb *	abc caab
5				aba cbac	abb caac *
6				aba bcac	abb caca *
7				abc aacb *	
8				abc aabc	
9				abc cbba *	

Таких схем, помимо типа $[5^1 2^1]$, насчитывается семь. Все представленные схемы рифмовок можно изобразить в виде соответствующих графов, включая и те графы, которые в статье опущены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложен подход к исследованию симметричных ожерелий, основанный на рассмотрении ожерелий как беспорядков разных типов, и приведены результаты подсчета симметричных *n*-ожерелий для $n = 4,\ldots,7$. Ожерелья рассматриваются как беспорядки степени *n*. Доказана основная теорема, согласно которой несимметричных ожерелий длиной $n \le 6$ не существует. Для рассмотренных случаев установлено, что ожерелья каждого типа обладают одной четностью. Показано, что типы $[4^1 3^1]$- и $[3^1 2^2]$-ожерелья длиной 7 содержат классы несимметричных ожерелий. Введено понятие диаграмм симметрий ожерелий. Установлена связь между порядком симметрии ожерелий
и мощностью соответствующих классов симметрий.

Дальнейшие направления исследований могут быть связаны с поиском критериев симметричности ожерелий, в частности, с установлением характеристических свойств беспорядков, характеризующих симметричные ожерелья. Эта задача содержательно близка к задаче задания выпуклого многогранника в R^3, рассмотренной в [15]. В этой работе показано, что минимальное число

параметров, достаточных для задания многогранника, – это число расстояний между его вершинами, и указан алгоритм однозначного восстановления по ним многогранника. Тот же вопрос возникает и в нашем случае: какая минимальная система параметров должна быть задана, чтобы можно было однозначно восстановить соответствующее ей симметричное ожерелье?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Харари Ф.* Теория графов. – М.: Мир, 1973. – 302 с.

2. *Эндрюс Г.* Теория разбиений. – М.: Наука, 1982. – 256 с.

3. *Сачков В.Н.* Введение в комбинаторные методы дискретной математики. – М.: Наука, 1982. – 384 с.

4. *Яковенко Д.И.* Задача об ожерельях // Вестник Омского университета. – 1998. – Вып. 2. – С. 21–24.

5. *Григорьев Ю.Д.* Перечисление симметричных ожерелий // Вестник ТГУ. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – Т. 61. – С. 97–107. – DOI: 10.17223/19988605/61/10.

6. *Petitjean M.* Chirality and symmetry measures: some open problems // Workshop on Rigidity and Symmetry, The Fields Institute, Toronto, October 17–21 2011. – Toronto, 2011.

7. *Питерсон У., Уэлдон Э.* Коды, исправляющие ошибки. – М.: Мир, 1976. – 600 с.

8. *Шень А.* Перестановки. – М.: Изд-во МЦИМО, 2020. – 76 с. – ISBN 978-54439-2776-3.

9. *Марковский М.В.* Комбинаторика (лекции). Лекция 5. Задача о беспорядках. – URL: https://textarchive.ru/c-1099784-p3.html (дата обращения: 30.08.2023).

10. *Портер Л.Г.* Симметрия – владычица стихов: очерк начал общей теории поэтических структур. – М.: Языки славянской культуры, 2003. – 256 с.

11. *Fulton W., Harris J.* Representation theory: A fist Course. – New York: Springer Science and Business Media, 2013. – 551 p. – (Graduate texts in mathematics; vol. 129).

12. *Жабин А.А.* Спиновые числа Гурвица и операторы разрезания-склейки: магистерская диссертация / Московский физико-технический институт. – Долгопрудный, 2022. – 46 с.

13. *Оре О.* Теория графов. – М.: Наука, 1968. – 352 с.

14. *Wiener H.* Structural determination of paraffin boiling points // Journal of the American Chemical Society. – 1947. – Vol. 69, N 1. – P. 17–20.

15. *Пулатов А.К., Саматова Н.Ф.* О сложности задания выпуклого многогранника в R^3 // Дискретная математика. – 1991. – Т. 9, вып. 2. – С. 148–156.

Григорьев Юрий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ Санкт-Петербургского государственного технического университета («ЛЭТИ»), специалист в области теории планирования эксперимента, теории риска и квантитативной филологии. Имеет более 160 публикаций, в том числе 4 монографии. E-mail: yuri_grigoriev@mail.ru

Grigoriev Yu.D., D.Sc. (Eng). professor at the department of computer science in St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI), an expert in the field of experimental design theory, risk theory and quantitative philology. He has more 160 publications including 4 monographs. E-mail: yuri_grigoriev@mail.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-19-36

Disorders Problem[*]

YU.D. GRIGORIEV

St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI), 5 Professor Popov Street, St. Petersburg, 197376, Russian Federation

yuri_grigoriev@mail.ru

Abstract

The problem of characterizing symmetric necklaces as disorders is considered. Such an idea is an alternative approach to the one using Poya's enumeration theorem, including Burnside's lemma. The relationship between partitions of numbers and permutation types is shown. Disorder types are associated with necklace types considered as permutations in which no element remains in place, as well as with disorders with fixed elements. The distributions of disorders by types for necklaces up to the seventh degree are studied. The number and enumeration of disorders of each type is carried out, and their evenness is established.

Particular attention is paid to the study of the symmetric necklaces properties. Classes of symmetry and asymmetry are enumerated for each necklace type considered. At the same time, the concepts of chiral and achiral symmetry are introduced as varieties of axial symmetry. Relationships between the power of symmetry classes and the order of symmetry of necklaces are revealed. The concept of symmetry diagrams for necklaces is introduced. Diagrams could be applied for determining the properties of invariance of symmetric and asymmetric necklaces of a given length. The concept of congruence is used as an equivalence relation between necklaces. It allows implementing a geometric approach to the study of necklaces and the visualization of the results obtained. For this purpose, necklaces are associated with multiconnected non-oriented graphs, the vertices of which are the vertices of regular polygons. In this case, the number of vertices in the graph corresponds to the necklace's length, and the number of connected components coincides with the number of bead colors.

As an application of the results obtained, the possibility of studying the accent dynamics of poetic stanzas vertically using necklaces is considered. Empirical data on the use of various types of seven-line stanzas in poetic practice are presented. It is noted that approximately a quarter of the existing symmetric types of necklaces for various reasons do not find practical application.

Keywords: permutation, necklace, symmetry, achirality, chirality, partition function, disorder, symmetry diagram

REFERENCES

1. Harary F. *Graph Theory*. Reading, Mass., Addison-Wesley Pub. Co., 1969 (Russ. ed.: Kharari F. *Teoriya grafov*. Moscow, Mir Publ., 1973. 302 p.).

2. Andrews G.E. *The Theory of Partition*. Reading, Mass., Addison-Wesley Pub. Co., 1976 (Russ. ed.: Endryus G. *Teoriya razbienii*. Moscow, Nauka Publ., 1982. 256 p.).

3. Sachkov V.N. *Vvedenie v kombinatornye metody diskretnoi matematiki* [Introduction to combinatorial methods of discrete mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 384 p.

4. Yakovenko D.I. Zadacha ob ozherel'yakh [Necklaces problem]. *Vestnik Omskogo universiteta = Herald of Omsk university*, 1998, no. 2, pp. 21–24.

[*] *Received 24 April 2023.*

5. Grigoriev Yu.D. Perechislenie simmetrichnykh ozherelii [Enumeration of symmetrical necklaces]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*, 2022, vol. 61, pp. 97–107. DOI: 10.17223/19988605/61/10.

6. Petitjean M. Chirality and symmetry measures: some open problems. *Workshop on Rigidity and Symmetry*, The Fields Institute, Toronto, October 17–21, 2011.

7. Peterson W.W., Weldon E.J. *Error-Correcting codes*. Cambridge, London, The Mit Press, 1972 (Russ. ed.: Piterson U., Ueldon E. *Kody, ispravlyayushchie oshibki*. Moscow, Mir Publ., 1976. 600 p.).

8. Shen A. *Perestanovki* [Permutations]. Moscow, MTsIMO Publ., 2020. 76 p. ISBN 978-54439-2776-3.

9. Markowsky M. V. *Kombinatorika (Lektsii). Lektsiya 5. Zadacha o besporyadkakh.* [Combinatorial analysis (Lessons). Lesson 5. Disorders problem]. Available at: https://textarchive.ru/c-1099784-p3.html (accessed 30.08.2023).

10. Porter L.G. *Simmetriya – vladychitsa stikhov: ocherk nachal obshchei teorii poeticheskikh struktur* [Symmetry is the sovereign of poetry. Essay on the Principles of a general theory of poetic structures]. Moscow, Yazyki slavyanskoi kul'tury Publ., 2003. 256 p.).

11. Fulton W., Harris J. *Representation theory: A fist Course*. New York, Springer Science and Business Media, 2013. 551 p.

12. Zhabin A.A. *Spinovye chisla Gurvitsa i operatory razrezaniya-skleiki* [Spin Hurwitz numbers and cut-glue operators]. Master's dissertation. Moscow Institut of Physics and Technology. Dolgoprudny town, Moscow region, 2022. 46 p.

13. Ore Ø. *Theory of Graphs*. Providence, American Mathematical Society, 1962 (Russ. ed.: Ore O. *Teoriya grafov*. Moscow, Nauka Publ., 1968. 352 p.).

14. Wiener H. Structural determination of paraffin boiling points. *Journal of the American Chemical Society*, 1947, vol. 69, no. 1, pp. 17–20.

15. Pulatov A.K., Samatova N.F. O slozhnosti zadaniya vypuklogo mnogogrannika v R^3 [Complexity of the specification of a convex polyhedron in R^3]. *Diskretnaya matematika = Discrete Mathematics and Applications*, 1991, vol. 9, iss. 2, pp. 148–156. (In Russian).

Для цитирования:

Григорьев Ю.Д. Разработка архитектурного решения программного обеспечения для устройств интернет-вещей // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 3 (91). – С. 19–36. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-19-36.

For citation:

Grigoriev Yu.D. Zadacha o besporyadkakh [Disorders Problem]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 3 (91), pp. 19–36. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-19-36.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 91, № 3, 2023, с. 37–46

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 91, No. 3, 2023, pp. 37–46

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 681.5.037.4

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-37-46

Применение модального метода синтеза для дискретных систем*

А.А. ВОЕВОДА[a], В.И. ШИПАГИН[b]

630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

[a] *ucit@ucit.ru* [b] *shipagin@mail.ru*

Работы, рассматривающие модальный синтез, используют полиномиальное разложение передаточных функций моделей объекта и регулятора в основном для непрерывных систем автоматического управления. При этом в некоторых случаях требуется рассмотрение систем дискретного вида. Приведен пример синтеза системы автоматического управления для стола точного позиционирования, приводимого в действие двигателем с прямым приводом. Такие системы обеспечивают точное позиционирование в процессах изготовления и обработки деталей. Они используются в различных областях промышленности: медицинской, аэрокосмической, автомобильной и других. В частности, приведенная модель стола точного позиционирования используется для упаковки полупроводниковых элементов. Особенностью данного примера является представление передаточной функции модели объекта в дискретном виде и наличие в ней звеньев задержки на четыре такта. Кроме этого, указанная модель неустойчива из-за наличия в ней полюсов, лежащих на границе устойчивости. В качестве метода синтеза применяется модальный метод, использующий полиномиальное разложение передаточной функции модели объекта управления и регулятора. Также продемонстрирован подход, позволяющий сократить объем вычислений при синтезе регуляторов благодаря уменьшению порядка рассматриваемой передаточной функции модели объекта и сокращению числа неизвестных параметров регулятора. При этом получен регулятор, отличающийся от исходного. Анализируются различные варианты выбора желаемых полюсов передаточной функции замкнутой системы. Выбор желаемых полюсов осуществляется в пользу уменьшения величины перерегулирования системы относительно переходных процессов системы с изначальным выбором полюсов.

Ключевые слова: дискретная система, система автоматического управления, запаздывание, астатические системы, синтез дискретных систем, полиномиальный метод, передаточная функция, диофантово уравнение, матрица Сильвестра, звено запаздывания, характеристический полином

* *Статья получена 21 декабря 2022 г.*

ВВЕДЕНИЕ

В работе применяется модальный метод синтеза регуляторов, использующий полиномиальное разложение передаточных функций модели объекта управления и регулятора, продемонстрированный в работах [1, 2]. Он основан на решении диофантова уравнения, в котором в качестве неизвестных выступают параметры передаточной функции (ПФ) регулятора, а известными являются параметры ПФ объекта и желаемого характеристического полинома замкнутой системы (ХПЗС). То есть необходимые требования к системе управления в данном случае могут быть обеспечены через расположение корней характеристического полинома замкнутой системы. Для решения диофантова уравнения авторами [3–9] используется матрица Сильвестра.

В приведенных работах в основном рассматриваются только непрерывные системы. Однако в связи с развитием цифровой вычислительной техники всё чаще системы представляются не в аналоговом, а в дискретном виде [10–12]. В настоящей работе рассмотрен случай синтеза регулятора для системы, представленной в дискретном виде. Для синтеза применяется модальный метод, использующий полиномиальное разложение ПФ объекта и регулятора. Для наглядности демонстрируется пример одноканальной системы, однако данную методику можно также распространить и на многоканальный случай. Кроме этого, приводится также пример использования модификации алгоритма, представленного в работе [4], позволяющей сократить объем и сложность вычислений при синтезе САУ.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается модель объекта «стол точного позиционирования с двигателем на прямом приводе» [13, 14]. Такая система используется, например, для упаковки полупроводниковых элементов. Объект может перемещаться с ускорением свыше $5g$ и точностью позиционирования на микронном уровне. Объект управления выбран с учетом удобства демонстрации расчетов синтеза системы автоматического управления (САУ) с помощью модального метода, использующего полиномиальное разложение ПФ модели объекта и регулятора.

Для синтеза регулятора и исследования свойств системы используется номинальная модель объекта в дискретном времени, заданная ПФ:

$$w_o(z^{-1}) = \frac{z^{-4} b_0 (1 + z^{-1})}{1 - 2z^{-1} + z^{-2}}, \tag{1}$$

где $z \in \mathbb{C}$ – аргумент дискретного преобразования Лапласа; b_0 – параметр модели. В настоящей работе для простоты будем считать, что $b_0 = 1$ (с помощью указанного метода легко можно пересчитать и для других значений параметра). Расчеты приведены для шага дискретизации $\Delta t = 0.1$ с.

Представим выражение (1) в удобном для работы алгоритма виде:

$$w_o(z) = \frac{z+1}{z^5 - 2z^4 + z^3} = \frac{z+1}{z^3 (z-1)^2}. \tag{2}$$

Полиномы числителя и знаменателя ПФ объекта взаимно-простые (т. е. не имеют общих корней), а значит, согласно [1] данная модель объекта управляема и наблюдаема. Объект является неустойчивым, так как некоторые корни характеристического уравнения лежат на границе единичного круга на *z*-плоскости корней $p_{1,2} = 1$. В ПФ объекта присутствует ноль $n_1 = -1$. Переходная и импульсная характеристики приведены на рис. 1.

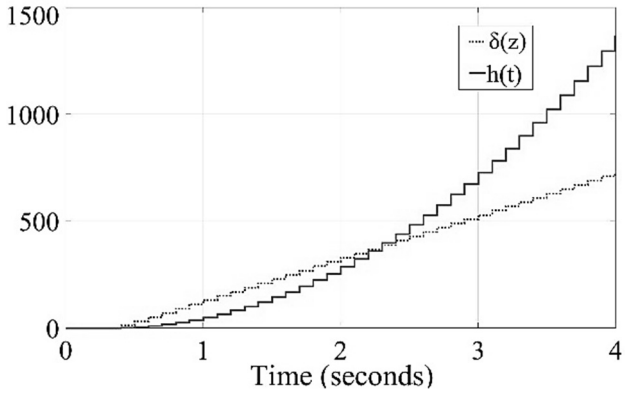


Рис. 1. Реакция объекта на типовые воздействия

Fig. 1. Various variants of closed system block schemes

САУ строится по принципу обратной (отрицательной) связи (рис. 2). Существует несколько вариантов построения САУ по принципу обратной связи.

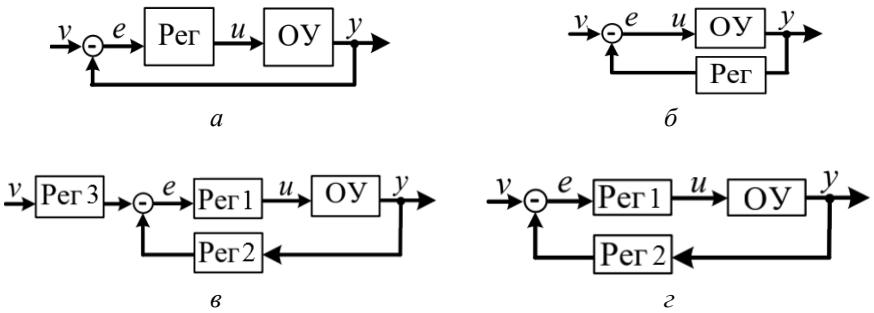


Рис. 2. Различные варианты структурных схем замкнутой системы

Fig. 2. Various options for closed system block schemes

Здесь Рег, Рег1, Рег2, Рег3 – блоки регулирования, ОУ – объект управления. В настоящей работе рассматривается система с регулятором в прямом канале с объектом управления (рис. 2, *а*). На вход системы подается задание v. На блок регулирования поступает ошибка e между задающим воздействием v и выходом объекта *y*. На выходе блока регулирования формируется управляющий сигнал *u*, который поступает на объект управления. Необходимо рассчитать передаточную функцию регулятора по заданным полюсам желаемого характеристического полинома замкнутой системы.

2. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА

Если представить ПФ регулятора и объекта соответственно в виде

$$w_r(z) = \frac{x(z)}{y(z)}, \qquad w_o(z) = \frac{n(z)}{d(z)}, \tag{3}$$

где $x(z)$, $n(z)$ – полиномы числителя ПФ регулятора и объекта соответственно; $y(z)$, $d(z)$ – полиномы знаменателя ПФ регулятора и объекта соответственно. При этом согласно уравнения (2) и (3) полиномы числителя и знаменателя можем выразить следующим образом:

$$n(z) = n_1 z + n_0, \qquad d(z) = d_5 z^5 + d_4 z^4 + d_3 z^3 + d_2 z^2 + d_1 z + d_0, \tag{4}$$

где $n_1 = n_0 = d_3 = d_5 = 1$, $d_0 = d_1 = d_2 = 0$, $d_4 = -2$. ПФ замкнутой системы, представленной на рис. 2, *а*, может быть выражена в следующем виде:

$$w_{cl}(z) = \frac{n(z)x(z)}{d(z)y(z) + n(z)x(z)}, \tag{5}$$

где $d(z)y(z) + n(z)x(z)$ – ХПЗС.

Приведем два варианта модального синтеза, использующего полиномиальное матричное разложение ПФ объекта и регулятора. Один из них придерживается алгоритма, приведенного в работе [3], а другой связан с применением понижения порядка рассматриваемой ПФ объекта, что, в свою очередь, сокращает объем требуемых для синтеза регулятора вычислений.

2.1. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА

Согласно рекомендациям, приведенным в [1, 3], выберем регулятор полного порядка. Тогда его степень $m = n - 1 = 4$, где $n = 5$ – степень знаменателя объекта (2):

$$w_r(z) = \frac{x_4 z^4 + x_3 z^3 + x_2 z^2 + x_1 z + x_0}{y_4 z^4 + y_3 z^3 + y_2 z^2 + y_1 z + y_0}, \tag{6}$$

где x_i, $y_i \in R$ – неизвестные параметры регулятора, $i = 1,...,4$. Согласно (5) степень желаемого ХПЗС $m + n = 9$. В качестве желаемого ХПЗС взят $(z - 0.3)^9$. Выбор желаемого ХПЗС связан с желанием уменьшения величины перерегулирования (сравнительная характеристика переходных процессов для различных вариантов задания полюсов представлена в разделе 3 настоящей статьи). Для определения неизвестных параметров регулятора (3) составим систему уравнений вида $\Im\Re = C$, где $\Im$ – матрица Сильвестра, $\Re$ – вектор параметров регулятора, C – вектор параметров желаемой ХПЗС:

$$\Im = \begin{pmatrix} d_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_4 & 0 & d_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_3 & 0 & d_4 & 0 & d_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_2 & 0 & d_3 & 0 & d_4 & 0 & d_5 & 0 & 0 & 0 \\ d_1 & n_1 & d_2 & 0 & d_3 & 0 & d_4 & 0 & d_5 & 0 \\ d_0 & n_0 & d_1 & n_1 & d_2 & 0 & d_3 & 0 & d_4 & 0 \\ 0 & 0 & d_0 & n_0 & d_1 & n_1 & d_2 & 0 & d_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_0 & n_0 & d_1 & n_1 & d_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_0 & n_0 & d_1 & n_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_0 & n_0 \end{pmatrix}, \ \Re = \begin{pmatrix} y_4 \\ x_4 \\ y_3 \\ x_3 \\ y_2 \\ x_2 \\ y_1 \\ x_1 \\ y_0 \\ x_0 \end{pmatrix}, \ C \approx \begin{pmatrix} 1 \\ -2.7 \\ 3.24 \\ -2.27 \\ 1.02 \\ -0.31 \\ 0.06 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Здесь вектор C определяется коэффициентами полинома желаемого ХПЗС $(z-0.3)^9$ сверху вниз, начиная от старшей степени к младшей.

Тогда вектор неизвестных параметров регулятора $\Re$ может быть определен как $\Re = \Im^{-1}C$. Полученные параметры подставляем в выражение (6) и получаем $w_r(z) = \dfrac{0.2z^4 - 0.2z^3 - 0.008z^2}{z^4 - 0.7z^3 + 0.8z^2 + 0.1z + 0.2}$. При этом ПФ замкнутой системы

$$w_{cl}(z) = \frac{(z^2 + 0.05z + 0.001)(z+1)(z+0.098)(z-0.894)}{(z-0.3)^9}. \qquad (7)$$

Как видно из выражения (7), полюса представленной системы совпадают с корнями желаемого ХПЗС, значит, расчеты проведены верно. Полюса находятся в области устойчивости, а значит, представленная система устойчива.

2.2. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА В УПРОЩЕННОМ РЕЖИМЕ

Для упрощения процедуры синтеза регулятора понизим порядок рассматриваемой ПФ объекта управления. Для этого воспользуемся подходом, примененным в работе [15]. Выберем, так же как и в предыдущем случае, регулятор полного порядка, тогда его степень $m = n - 1 = 4$, где $n = 5$ – степень знаменателя объекта (2). Если для системы (см. рис. 2) ПФ регулятора представить в виде

$$w_r(z) = z^3 \tilde{w}_r(z) = \frac{z^3(\tilde{x}_1 z + \tilde{x}_0)}{\tilde{y}_4 z^4 + \tilde{y}_3 z^3 + \tilde{y}_2 z^2 + \tilde{y}_1 z + \tilde{y}_0}, \qquad (8)$$

где $\tilde{x}_1$, $\tilde{x}_0$, $\tilde{y}_4$, $\tilde{y}_3$, $\tilde{y}_2$, $\tilde{y}_1$, $\tilde{y}_0$ – неизвестные параметры регулятора; $\tilde{w}_r(z)$ – преобразованная ПФ регулятора, то при рассмотрении ПФ замкнутой системы $w_{cl}(z)$ произойдет взаимное сокращение в числителе $w_r(z)$ и знаменателе $w_o(z)$ общего множителя z^3, и можно перейти к рассмотрению системы вида $w_{cl}(z) = \dfrac{\tilde{w}_o(z)\tilde{w}_r(z)}{1 + \tilde{w}_o(z)\tilde{w}_r(z)}$, где $\tilde{w}_o(z) = \dfrac{z+1}{(z-1)^2}$ – преобразованная ПФ объекта.

ПФ преобразованного объекта представим через полиномиальное разложение: $\tilde{w}_o(z) = \tilde{d}^{-1}(z)n(z)$, где $n(z) = n_1 z + n_0$, $\tilde{d}(z) = \tilde{d}_2 z^2 + \tilde{d}_1 z + \tilde{d}_0$ – полиномы «числитель» и «знаменатель» преобразованной ПФ ОУ соответственно. При этом $d(z) = \tilde{d}(z)z^3$.

Степень желаемого ХПЗС $m + n = 6$. В качестве желаемого ХПЗС взят $(z-0.3)^6$. Для определения неизвестных параметров регулятора (8) составим систему уравнений вида $\tilde{\Im}\tilde{\Re} = \tilde{C}$, где $\tilde{\Im}$ – матрица Сильвестра для преобразованной ПФ объекта, $\tilde{\Re}$ – вектор параметров регулятора (8), $\tilde{C}$ – вектор желаемых параметров ХПЗС:

$$\tilde{\Im} = \begin{pmatrix} \tilde{d}_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{d}_1 & \tilde{d}_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{d}_0 & \tilde{d}_1 & \tilde{d}_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{d}_0 & \tilde{d}_1 & \tilde{d}_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{d}_0 & \tilde{d}_1 & n_1 & \tilde{d}_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \tilde{d}_0 & n_0 & \tilde{d}_1 & n_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tilde{d}_0 & n_0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{\Re} = \begin{pmatrix} \tilde{y}_4 \\ \tilde{y}_3 \\ \tilde{y}_2 \\ \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_0 \\ \tilde{y}_0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{C} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1.8 \\ 1.35 \\ -0.54 \\ 0.12 \\ -0.01 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Здесь вектор $\tilde{C}$ определяется коэффициентами желаемого ХПЗС $(z-0.3)^6$ сверху вниз, начиная от старшей степени к младшей. Тогда вектор неизвестных параметров регулятора может быть определен как $\tilde{\Re} = \tilde{\Im}^{-1}\tilde{C}$. Полученные параметры подставляем в выражение (8) и получаем $w_r(z) = \dfrac{z^3(0.47z - 0.42)}{z^4 + 0.2z^3 + 0.75z^2 + 0.76z + 0.42}$. При этом ПФ замкнутой системы

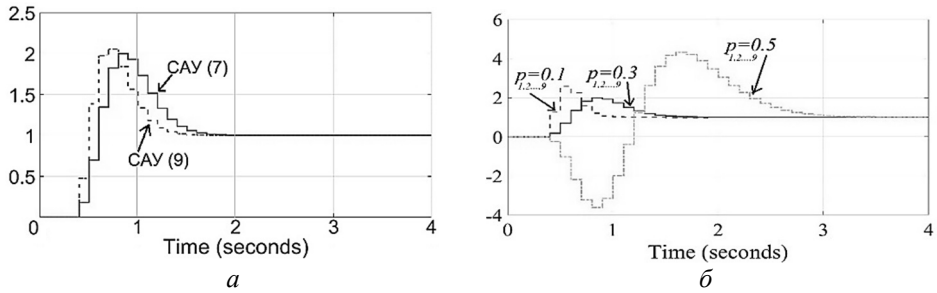
$$w_{cl}(z) = \frac{z^3(z+1)(z-0.876)}{(z-0.3)^6}. \tag{9}$$

Как видно из выражения (9), полюса представленной системы совпадают с корнями желаемого ХПЗС. Они находятся в области устойчивости, а значит, представленная система устойчива.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Получим переходную функцию для САУ (7) и (9) (рис. 3, *а*), а также переходные функции для различных желаемых ХПЗС (рис. 3, *б*).

Отсутствие реакции в начале процесса управления связано с задержкой в ОУ на четыре такта. Достаточно большое значение перерегулирования может быть связано с наличием в $w_{cl}(z)$ нулей, принимающих значение на границе устойчивости.



а *б*

Рис. 3. Переходные функции САУ для различных желаемых ХПЗС

Fig. 3. ACS transition functions for various desired CSCPs

Из рис. 3, *б* видно, что выбор желаемых полюсов $p_{1,2,...,9} = 0.3$ в разделе 2.2 связан с желанием уменьшить величины перерегулирования переходных процессов системы. Из рис. 3, *а* видно, что показатели качества САУ, полученной упрощенным способом, принципиально не отличаются от способа, представленного в работе [3]. При этом в случае использования предложенного способа удается понизить порядок ПФ рассматриваемого объекта с пятого на второй. Кроме этого, снижается также количество неизвестных параметров регулятора с десяти до семи. С помощью указанного способа удалось сократить число неизвестных параметров регулятора с десяти до семи и размер матрицы Сильвестра с 10×10 до 7×7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенной работы была синтезирована САУ для одноканального объекта, представленного в дискретном виде. Особенностью объекта можно считать наличие в его составе звеньев запаздывания на четыре такта и наличие неустойчивых полюсов ПФ.

Синтез САУ осуществлялся модальным методом, использующим полиномиальное разложение ПФ объекта и регулятора. Показан способ понижения порядка рассматриваемой ПФ объекта для сокращения необходимого объема вычислений при синтезе САУ. Продемонстрированы различные варианты выбора значений желаемых полюсов системы. Выбор желаемого характеристического полинома сделан в пользу уменьшения величины перерегулирования системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chen C.T.* Linear system theory and design. – 2nd ed. – New York: Oxford, 1999. – 334 p.

2. *Antsaklis P.J., Michel A.N.* Linear systems. – Switzerland: Birkhauser, 1997. – 669 p.

3. *Бобобеков К.М., Воевода А.А., Шипагин В.И.* Полиномиальный метод синтеза автоматического управления для одноканальных и многоканальных объектов: монография. – Душанбе: ТТУ им. М.С. Осими, 2021. – 192 с.

4. *Филюшов В.Ю.* Полиномиальный метод синтеза регуляторов для многоканальных объектов с неквадратной матричной передаточной функцией: дис. … канд. техн. наук: 2.3.1. – СПб., 2022. – 177 с.

5. *Вороной В.В.* Полиномиальный метод расчета многоканальных регуляторов пониженного порядка: дис. … канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск, 2013. – 173 с.

6. *Шоба Е.В.* Модальный метод синтеза многоканальных динамических систем с использованием полиномиального разложения: дис. … канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск, 2013. – 192 с.

7. *Воевода А.А., Шипагин В.И.* Синтез многоканального регулятора для объекта с двумя входными и двумя выходными каналами с использованием полиномиального матричного разложения // 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Сочи, 2021. – С. 823–828. – DOI: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537350. – На англ. яз.

8. *Воевода А.А., Шипагин В.И.* Синтез регулятора для систем с запаздыванием // 2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – Новосибирск, 2021. – С. 559–563. – DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647686. – На англ. яз.

9. *Voevoda A.A., Shipagin V.I., Troshina G.V.* Controller synthesis by a polynomial method in order to achieve minimal overshoot for systems with a delay // 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). – St. Petersburg, 2022. – P. 908–911. – DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755583.

10. *Фридман А.Я.* Опыт интеллектуализации методов ситуационного моделирования дискретных нестационарных пространственных объектов // Автоматика и телемеханика. – 2022. – № 6. – С. 151–168. – DOI: 10.31857/S0005231022060113. – EDN ADHKCB.

11. *Панкин А.М., Калютик А.А., Костарев В.С.* Контроль технического состояния и остаточного ресурса дискретно-непрерывных объектов // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2022. – Т. 1. – С. 13–14. – EDN BYPTJU.

12. *Паршуков А.Н.* Метод синтеза модального регулятора для линейного дискретного объекта управления с интервальной неопределенностью коэффициентов // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – № 60. – С. 4–12. – DOI: 10.17223/19988605/60/1.

13. *Андриевский Б.Р.*, *Фуртат И.Б.* Наблюдатели возмущений: методы и приложения. Ч. 2. Приложения // Автоматика и телемеханика. – 2020. – № 10. – С. 35–92. – DOI: 10.31857/S0005231020100025. – EDN IBYYUE.

14. *Kempf C.J., Kobayashi S.* Disturbance observer and feedforward design for a high-speed direct-drive positioning table // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 1999. – Vol. 7, N 5. – P. 513–526.

15. *Воевода А.А., Шипагин В.И., Филюшов В.Ю.* Расчет регулятора для объекта с запаздыванием // Безопасность цифровых технологий. – 2021. – № 3 (102). – С. 9–20. – DOI: 10.17212/2782-2230-2021-3-9-20.– EDN YTVVTX.

Воевода Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – управление многоканальными объектами. Имеет более 300 публикаций. E-mail: ucit@ucit.ru

Шипагин Виктор Игоревич, аспирант кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. В настоящее время специализируется в области синтеза систем управления техническими системами. E-mail: shipagin@mail.ru

Voevoda Aleksandr A., D.Sc. (Eng.), professor, professor at the automation department in Novosibirsk State Technical University. The main field of his scientific research is the management of multi-channel objects. He has more than 300 publications. E-mail: ucit@ucit.ru

Shipagin Victor I., a postgraduate student at the automation department in Novosibirsk State Technical University. Currently he specializes in the field of synthesis of regulators for technical systems. E-mail: shipagin@mail.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-37-46

Application of the modal design method for discrete systems[*]

A.A. VOEVODA[a], *V.I. SHIPAGIN*[b]

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] *ucit@ucit.ru* [b] *shipagin@mail.ru*

Abstract

Works considering modal synthesis and using polynomial decomposition of transfer functions of object and controller models are considered mainly for continuous automatic control systems. At the same time, in some cases, it is necessary to consider systems of a discrete type. An example of the synthesis of an automatic control system for an accurate positioning of a table driven by a direct-drive motor is given. Such systems provide accurate positioning in the processes of manufacturing and processing of parts. They are used in various fields of industry: medical, aerospace, automotive and others. In particular, the above model of the precise positioning table is used for packaging semiconductor elements. A feature of this example is the representation of the transfer function of the object model in a discrete form and the presence of four-cycle delay links in it. In addition, this model is unstable due to the presence of poles lying on the stability boundary in it. As a synthesis method, a modal method is used, using a polynomial decomposition of the transfer function of the model of the control object and controller. An approach is also demonstrated that makes it possible to reduce the number of calculations in the synthesis of regulators by reducing the order of the transfer function of the considered object model and reducing the number of unknown parameters of the regulator. At the same time, a regulator is obtained that differs from the original one. Various options for choosing the desired poles of the transfer function of a closed system are analyzed. The choice of the desired poles is carried out in favor of reducing the amount of overshoot of the system relative to the transients of the system with the initial choice of poles.

Keywords: discrete system, automatic control system, delay, astatic systems, synthesis of discrete systems, polynomial method, transfer function, diophantine equation, Sylvester matrix, delay link, characteristic polynomial

REFERENCES

1. Chen C.T. *Linear system theory and design*. 2nd ed. New York, Oxford, 1999. 334 p.
2. Antsaklis P.J., Michel A.N. *Linear systems*. Switzerland, Birkhauser, 1997. 669 p.
3. Bobobekov K.M., Voevoda A.A., Shipagin V.I. *Polinomial'nyi metod sinteza avtomaticheskogo upravleniya dlya odnokanal'nykh i mnogokanal'nykh ob"ektov* [Polynomial method for the synthesis of automatic control systems for single-channel and multi-channel objects]. Dushanbe, Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi Publ., 2021. 192 p. (In Russian).
4. Filyushov V.Yu. *Polinomial'nyi metod sinteza regulyatorov dlya mnogokanal'nykh ob"ektov s nekvadratnoi matrichnoi peredatochnoi funktsiei*. diss. kand. tekhn. nauk [A polynomial method for synthesizing regulators for multichannel objects with a non-square matrix transfer function. PhD eng. sci. diss.]. St. Petersburg, 2022. 177 p.
5. Voronoi V.V. *Polinomial'nyi metod rascheta mnogokanal'nykh regulyatorov ponizhennogo poryadka*. Diss. kand. tekhn. nauk [Design of multi-channel reduced degree controllers. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2013. 173 p.
6. Shoba E.V. *Modal'nyi metod sinteza mnogokanal'nykh dinamicheskikh sistem s ispol'zovaniem polinomial'nogo razlozheniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [The modal method for the synthesis of multichannel dynamic systems using a polynomial expansion. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2013. 192 p.

[*] *Received 21 December 2022.*

7. Voevoda A., Shipagin V. Synthesis of a multichannel controller for plant with two input and two output channels using polynomial matrix fraction. *2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, Sochi, Russian Federation, 2021, pp. 823–828. DOI: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537350.

8. Voevoda A.A., Shipagin V.I. Synthesis of a controller for a system with a delay. *2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*, Novosibirsk, Russian Federation, 2021, pp. 559–563. DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647686.

9. Voevoda A.A., Shipagin V.I., Troshina G.V. Controller synthesis by a polynomial method in order to achieve minimal overshoot for systems with a delay. *2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, St. Petersburg, 2022, pp. 908–911. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755583.

10. Fridman A.Ya. Opyt intellektualizatsii metodov situatsionnogo modelirovaniya diskretnykh nestatsionarnykh prostranstvennykh ob"ektov [Experience of intellectualization of situational modeling methods for discrete time-varying spatial objects]. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*, 2022, no. 6, pp. 151–168. DOI: 10.31857/S0005231022060113. (In Russian).

11. Pankin A.M., Kalyutik A.A., Kostarev V.S. Kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa diskretno-nepreryvnykh ob"ektov [Monitoring of the technical condition and residual life of discrete-continuous objects]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo» = Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*, 2022, vol. 1, pp. 13–14.

12. Parshukov A.N. Metod sinteza modal'nogo regulyatora dlya lineinogo diskretnogo ob"ekta upravleniya s interval'noi neopredelennost'yu koeffitsientov [Method of synthesis of a modal regulator for a linear discrete-time system with interval uncertainty of coefficients]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*, 2022, no. 60, pp. 4–12. DOI: 10.17223/19988605/60/1.

13. Andrievsky B.R., Furtat I.B. Nablyudateli vozmushchenii: metody i prilozheniya. Ch. 2. Prilozheniya [Disturbance observers: methods and applications. II. Applications]. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*, 2022, no. 10, pp. 35–92. DOI: 10.31857/S0005231020100025. (In Russian).

14. Kempf C.J., Kobayashi S. Disturbance observer and feedforward design for a high-speed direct-drive positioning table. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1999, vol. 7, no. 5, pp. 513–526.

15. Voevoda A.A., Shipagin V.I., Filiushov V.Yu. Raschet regulyatora dlya ob"ekta s zapazdyvaniem [Calculation of the regulator for the object with a delay]. *Bezopasnost' tsifrovykh tekhnologii = Digital Technology Security*, 2021, no. 3 (102), pp. 9–20. DOI: 10.17212/2782-2230-2021-3-9-20.

Для цитирования:

Воевода А.А., Шипагин В.И. Применение модального метода синтеза для дискретных систем // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 3 (91). – С. 37–46. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-37-46.

For citation:

Voevoda A.A., Shipagin V.I. Primenenie modal'nogo metoda sinteza dlya diskretnykh sistem [Application of the modal design method for discrete systems]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 3 (91), pp. 37–46. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-37-46.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 91, № 3, 2023, с. 47–68

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 91, No. 3, 2023, pp. 47–68

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 665.6/.7:502.171 DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-47-68

Анализ показателей масштабирования при оценке ресурсного потенциала объектов системы переработки нефтесодержащих отходов на основе метода DEA*

М.Ю. ДЕРЕВЯНОВ

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет

mder2007@mail.ru

В статье предлагается новый подход к оценке ресурсного потенциала объектов системы переработки нефтесодержащих отходов (НСО) на основе метода Data Envelopment Analysis (DEA) с учетом постоянного и переменного эффекта масштаба и сравнительный анализ показателей масштабирования, используемых при выборе наилучших объектов системы переработки НСО в процессе принятия обоснованных управленческих решений. Разработан четырехэтапный алгоритм расчета, в котором на первом этапе определяются оценки ресурсной ценности НСО в хранилищах. На втором и третьем этапах рассчитываются оценки ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» с учетом постоянного и переменного эффекта масштаба соответственно, а также эффект масштаба (постоянный, возрастающий или убывающий), характеризующий качественную оценку масштабных свойств объектов системы переработки НСО. На четвертом этапе определяется оценка эффективности масштабирования, которая характеризует величину влияния масштаба технологических операций на эффективность переработки НСО в анализируемой системе, и оптимальная последовательность переработки НСО в хранилищах по критерию повышения ресурсного потенциала объектов системы с учетом показателей масштабирования.

На примере системы переработки НСО в Самарском регионе рассчитаны оценки ресурсной ценности НСО в хранилищах, оценки ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» и соответствующие показатели масштабирования (эффект масштаба и оценка эффективности масштабирования). Проведено сравнение двух оптимальных последовательностей по критерию повышения ресурсного потенциала объектов системы с учетом постоянного и переменного эффекта масштаба и показано, каким образом показатели масштабирования могут влиять на принятие обоснованных управленческих решений.

Ключевые слова: нефтесодержащие отходы, система переработки, технологии, ресурсный потенциал, ресурсная ценность, эффект масштаба, эффективность масштабирования, Data Envelopment Analysis

---

* *Статья получена 26 июня 2023 г.*

ВВЕДЕНИЕ

По данным Росстата, с 2003 по 2021 год в Российской Федерации образовалось около 93,6 млрд тонн отходов производства и потребления, из которых 2,6 млрд тонн (2,8 %) относятся к опасным (с I по IV класс) [1]. Нефтесодержащие отходы (НСО), большая часть которых относится к III и IV классу опасности [2], образуются при строительстве нефтяных и газовых скважин, промысловой эксплуатации месторождений, переработке нефти и газа, очистке пластовых и сточных вод, содержащих нефтепродукты, при чистке резервуаров, нефтеловушек, прудов-отстойников, насосов, труб, нефтеналивных цистерн и другого оборудования [3]. При этом, по данным Минприроды РФ, масса загрязненного НСО грунта ежегодно увеличивается в среднем на 510 млн тонн [4]. К 2023 году в России отсутствовали законодательно утвержденные нормы утилизации и обезвреживания НСО, поэтому официальные статистические данные по объемам образования отходов этой категории отсутствуют. Большую часть отходов в секторах добычи нефти и газа и в предоставлении услуг в этой сфере составляют НСО, общая масса которых в 2021 году составила 14,15 млн тонн, из которых утилизации подверглись только 4,37 млн тонн (30,9 %), а остальная часть размещена в хранилищах и захоронена на специальных полигонах [1]. Общее количество таких полигонов уже превысило 20 тысяч штук, и общая их площадь ежегодно увеличивается примерно на 400 тысяч га [4]. К негативному антропогенному влиянию на окружающую среду полигонов и хранилищ добавляются неэкологичные технологии утилизации и обезвреживания НСО, основной из которых в настоящее время в России является сжигание [5]. Мировой опыт показывает [6–8], что глубину переработки НСО за счет применения современных технологий и обоснованных управленческих решений можно довести до 90 %, тогда как в России она не превышает 10 % [9].

Масштабное нарастание экологических проблем и неэффективное использование ресурсного потенциала НСО и технологий их переработки приводят к нерациональным потерям углеводородов, которые можно использовать в процессах рециклинга, рекуперации и регенерации при производстве битумных смесей [10], строительных материалов [11], топлива для котельных установок [12] и др. [13, 14].

Под ресурсным потенциалом понимается оценка, характеризующая эффективность извлечения полезных для вторичного использования компонентов НСО с помощью соответствующей технологии переработки с учетом ресурсной ценности отхода. Ресурсная ценность НСО определяется из соотношения полезных и вредных компонентов в отходе и характеризует интегральную сравнительную оценку его применимости в качестве материального и (или) энергетического ресурса.

Вышесказанное свидетельствует о необходимости принятия срочных мер по формированию обоснованных управленческих решений в системе переработки НСО. Двухэтапный подход к определению ресурсного потенциала объектов в системе переработки НСО на основе известного метода Data Envelopment Analysis (DEA) [15] описан в [16], где объектами являются хранилища отходов и технологические установки с соответствующей инфраструктурой. Размеры такой системы определяются географической локализацией мест хранения отходов и (или) размещения технологических установок. Авторами

в [17] представлен подход к анализу ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» с учетом постоянного эффекта масштаба и влияния оценки ресурсной ценности отходов на принятие управленческих решений. Недостатком этого подхода является учет постоянного эффекта масштаба, суть которого заключается в предположении о пропорциональном изменении объема получаемых из НСО углеводородов, необходимых для вторичного использования, при соответствующем изменении временных затрат, расхода реагентов и энергии (топлива) на переработку. Оценки ресурсного потенциала с учетом постоянного эффекта масштаба соответствуют общей технической эффективности процесса переработки НСО и показывают, насколько хорошо производственный процесс преобразует затрачиваемые на переработку временные и материальные ресурсы в полезные углеводороды без существенной связи между масштабом технологических операций и эффективностью переработки.

В статье предлагается новый подход к оценке ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» с учетом постоянного и переменного эффекта масштаба на основе метода DEA, а также сравнительный анализ показателей масштабирования (эффект масштаба и эффективность масштабирования), используемых при выборе наилучших объектов системы переработки НСО в процессе принятия обоснованных управленческих решений. Оценки ресурсного потенциала с учетом переменного эффекта масштаба соответствуют чистой технической эффективности процесса переработки отходов и демонстрируют связь эффективности переработки с масштабом технологических операций.

Анализ показателей масштабирования при исследовании различного рода объектов методом DEA достаточно широко применяется в экономике [18], здравоохранении [19], энергетике [20] и других областях [21–23]. Примеры использования подобного анализа в области переработки НСО автору неизвестны.

Эффективность масштабирования в работе определяется путем сопоставления оценок ресурсного потенциала с учетом постоянного и переменного эффекта масштаба (общей и чистой технической эффективности процесса переработки, соответственно) и характеризует величину влияния масштаба технологических операций на эффективность переработки НСО в хранилищах. Эффект масштаба демонстрирует качественный характер зависимости объема получаемых углеводородов (производительность технологии) пропорционально (постоянный эффект масштаба) или непропорционально (убывающий или возрастающий эффект масштаба) затраченному времени и ресурсам на переработку НСО в хранилище.

1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА

1.1. АЛГОРИТМ ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА

Предлагаемый новый способ определения оценок ресурсного потенциала объектов системы переработки НСО и принятия управленческих решений с учетом показателей масштабирования основан на двухэтапном подходе, рассмотренном в [17], и может быть представлен в виде алгоритма (рис. 1).

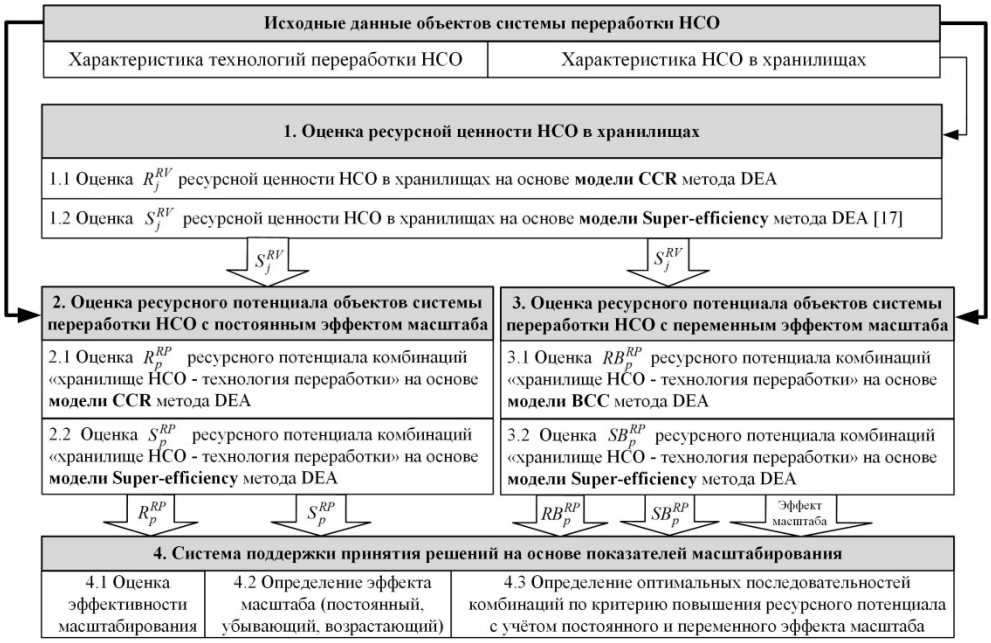


Рис. 1. Алгоритм определения оценок ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» и принятия управленческих решений с учетом показателей масштабирования

Fig. 1. An algorithm for determining estimates of the resource potential of the combinations "OCW storage – recycling technology" and making management decisions taking into account scaling indicators

Представленный алгоритм проведения анализа основан на использовании входоориентированных моделей CCR [24], BCC [25] и Super-efficiency [26] метода DEA и состоит из четырех этапов, которые подробно будут рассмотрены в разделах 1.2–1.4.

1.2. ОЦЕНКА РЕСУРСНОЙ ЦЕННОСТИ НСО В ХРАНИЛИЩАХ

Определение оценки ресурсной ценности НСО в хранилищах (этап 1 на рис. 1) проводится на основе двух взаимосвязанных задач математического программирования (ЗМП): **ЗМП 1.1** сформулирована на базе CCR модели метода DEA и рассмотрена в [27]; **ЗМП 1.2** сформулирована на базе модели Super-efficiency метода DEA и рассмотрена в [17].

В **ЗМП 1.1** и **1.2** входными параметрами является средневзвешенное содержание компонентов НСО (воды, асфальтенов и смол, минеральных и механических примесей, серы), не подходящих для дальнейшего использования и переработки. Выходным параметром является средневзвешенное содержание углеводородов в отходе, полезных для дальнейшего использования.

Результатом решения **ЗМП 1.2** на основе модели Super-efficiency метода DEA являются сравнительные оценки S_j^{RV} $(j=\overline{1,N})$ ресурсной ценности НСО в N хранилищах, которые используются на этапах 2 и 3 алгоритма (рис. 1) в качестве сравнительного параметра для определения оценок ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки», рассмат-

риваемых в качестве объектов сравнения в системе переработки НСО. Максимальная оценка S_j^{RV} в анализируемой группе соответствует наилучшему по компонентному составу хранилищу НСО, обладающему наиболее ценными ресурсами для вторичного использования.

1.3. ОЦЕНКА РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА ОБЪЕКТОВ СИСТЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ НСО

Определение оценок ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» (этап 2 на рис. 1) с учетом постоянного эффекта масштаба основано на взаимосвязанном решении ЗМП 2.1 и 2.2.

ЗМП 2.1 на основе CCR модели метода DEA имеет вид

$$RC_{\varphi}^{RP} = \sum_{r=1}^{R} w_{r\varphi} y_{r\varphi} \to \max_{W,H} \tag{1}$$

при условии

$$\begin{cases} \sum\limits_{\mu=1}^{M} h_{\mu\varphi} x_{\mu\varphi} = 1, \\ \sum\limits_{r=1}^{R} w_{rp} y_{rp} - \sum\limits_{\mu=1}^{M} h_{\mu p} x_{\mu p} \le 0, \\ h_{\mu p} \ge 0,\ w_{rp} \ge 0,\ p = \overline{1,P},\ \mu = \overline{1,M},\ r = \overline{1,R}. \end{cases} \tag{2}$$

ЗМП 2.2 на основе модели Super-efficiency метода DEA имеет вид

$$SC_{\varphi}^{RP} = \sum_{r=1}^{R} \tilde{w}_{r\varphi} y_{r\varphi} \to \max_{\tilde{W},\tilde{H}} \tag{3}$$

при условии

$$\begin{cases} \sum\limits_{\mu=1}^{M} \tilde{h}_{\mu\varphi} x_{\mu\varphi} = 1, \\ \sum\limits_{r=1}^{R} \tilde{w}_{rp} y_{rp} - \sum\limits_{\mu=1}^{M} \tilde{h}_{\mu p} x_{\mu p} \le 0, \\ \tilde{h}_{\mu p} \ge 0,\ \tilde{w}_{rp} \ge 0,\ p \ne f,\ p = \overline{1,P},\ \mu = \overline{1,M},\ r = \overline{1,R},\ f = \overline{1,F}. \end{cases} \tag{4}$$

В ЗМП (1)–(2) и (3)–(4) приняты следующие обозначения:

$RC_p^{RP} = RC_{\varphi}^{RP}$ и $SC_p^{RP} = SC_{\varphi}^{RP}$ – оценки ресурсного потенциала p-й комбинации «хранилище НСО – технология переработки», $p = \overline{1,P}$, по модели CCR и Super-efficiency соответственно;

P – общее число возможных комбинаций (объектов сравнения) в системе, включающей N хранилищ и T технологий переработки НСО;

φ – индекс целевого объекта сравнения из множества $\varphi = \overline{1,P}$, ресурсный потенциал которого оценивается;

$x_{\mu\varphi}$, $\mu = \overline{1,M}$ и $y_{r\varphi}$, $r = \overline{1,R}$ – значения входных и выходных параметров для целевого объекта в анализируемой системе соответственно; R – число анализируемых входных параметров; M – число анализируемых выходных параметров; $x_{\mu p}$ и y_{rp} – значения входных и выходных параметров для каждого p-го объекта, $p = \overline{1,P}$;

$h_{\mu p}, \tilde{h}_{\mu p}$ и $w_{rp}, \tilde{w}_{rp}$ – весовые коэффициенты для входных и выходных параметров соответственно в ЗМП (1)–(2) и (3)–(4);

f – порядковый номер объекта со значением оценки ресурсного потенциала $RC_f^{RP} = 1$, $f = \overline{1,F}$, в анализируемой группе из P объектов, полученной на основе решения ЗМП (1)–(2), который исключается из системы (4), где F – число объектов со значением оценки $RC_f^{RP} = 1$, $f = \overline{1,F}$.

Определение оценок ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» (этап 3 на рис. 1) с учетом переменного эффекта масштаба основано на взаимосвязанном решении ЗМП 3.1 и 3.2.

ЗМП 3.1 на основе BCC модели метода DEA имеет вид

$$RB_{\varphi}^{RP} = \sum_{r=1}^{R} q_{r\varphi} y_{r\varphi} - \delta_{\varphi} \to \max_{Q,G} \tag{5}$$

при условии

$$\begin{cases} \sum\limits_{\mu=1}^{M} g_{\mu\varphi} x_{\mu\varphi} = 1, \\ \sum\limits_{r=1}^{R} q_{rp} y_{rp} - \sum\limits_{\mu=1}^{M} g_{\mu p} x_{\mu p} - \delta_p \le 0, \\ g_{\mu p} \ge 0,\ q_{rp} \ge 0,\ p = \overline{1,P},\ \mu = \overline{1,M},\ r = \overline{1,R}. \end{cases} \tag{6}$$

ЗМП 3.2 на основе Super-efficiency метода DEA имеет вид

$$SB_{\varphi}^{RP} = \sum_{r=1}^{R} \tilde{q}_{r\varphi} y_{r\varphi} - \delta_{\varphi} \to \max_{\tilde{Q},\tilde{G}} \tag{7}$$

при условии

$$\begin{cases} \sum_{\mu=1}^{M} \tilde{g}_{\mu\varphi} x_{\mu\varphi} = 1, \\ \sum_{r=1}^{R} \tilde{q}_{rp} y_{rp} - \sum_{\mu=1}^{M} \tilde{g}_{\mu p} x_{\mu p} - \delta_p \le 0, \\ \tilde{g}_{\mu p} \ge 0,\ \tilde{q}_{rp} \ge 0,\ k \ne p,\ p = \overline{1,P},\ \mu = \overline{1,M},\ r = \overline{1,R},\ k = \overline{1,K}. \end{cases} \quad (8)$$

В ЗМП (5)–(6) и (7)–(8) приняты следующие обозначения:

$RB_p^{RP} = RB_\varphi^{RP}$ и $SB_p^{RP} = SB_\varphi^{RP}$ – оценки ресурсного потенциала p-й комбинации «хранилище НСО – технология переработки», $p = \overline{1,P}$, по модели ВСС и Super-efficiency соответственно;

$g_{\mu p}, \tilde{g}_{\mu p}$ и $q_{rp}, \tilde{q}_{rp}$ – весовые коэффициенты для входных и выходных параметров соответственно в ЗМП (5)–(6) и (7)–(8);

k – порядковый номер объекта со значением оценки ресурсного потенциала $RB_k^{RP} = 1$, $k = \overline{1,K}$, в анализируемой группе из P объектов, полученной на основе решения ЗМП (5)–(6), который исключается из системы (8), где K – число объектов со значением оценки $RB_k^{RP} = 1$, $k = \overline{1,K}$;

$\delta_\varphi = \delta_p$ – свободная переменная, величина или знак которой характеризует тип эффекта масштаба для p-го объекта сравнения:

- при $\delta_p = 0$ наблюдается *постоянный* эффект масштаба, означающий пропорциональное изменение входных $x_{\mu p}$ и выходных y_{rp} параметров в (5)–(6);
- при $\delta_p < 0$ наблюдается *убывающий* эффект масштаба, означающий, что изменение входных параметров $x_{\mu p}$ приводит к относительно меньшему изменению выходных параметров y_{rp} в (5)–(6);
- при $\delta_p > 0$ наблюдается *возрастающий* эффект масштаба, означающий, что изменение входных параметров $x_{\mu p}$ приводит к относительно большему изменению выходных параметров y_{rp} в (5)–(6).

В ЗМП 2.1, 2.2, 3.1 и 3.2 используются одинаковые входные и выходные параметры. Входными параметрами $x_{\mu p}$, $\mu = \overline{1,3}$, $p = \overline{1,P}$, увеличение которых приводит к снижению оценки ресурсного потенциала объектов системы, являются: x_{1p} – время переработки НСО, ч; x_{2p} – масса реагентов, т; x_{3p} – расход энергии (топлива), т. Выходными параметрами y_{rp}, $r = \overline{1,2}$, $p = \overline{1,P}$, увеличение которых приводит к увеличению оценки ресурсного потенциала объектов системы, являются: y_{1p} – масса полезных продуктов

рециклинга, т; $y_{2p} = S_j^{RV}$ – соответствующая оценка ресурсной ценности НСО в j-м хранилище, полученная в ходе решения ЗМП 1.2, рассмотренной в [17].

Каждая из ЗМП 2.1, 2.2, 3.1 и 3.2 решается P раз, т. е. для каждого p-го объекта сравнения отдельно, при этом в каждой задаче рассчитываются соответствующие значения оценок $\left(RC_p^{RP}, RB_p^{RP}, SC_p^{RP}, SB_p^{RP}\right)$ и весовых коэффициентов $\left(h_{\mu p}, \tilde{h}_{\mu p}, w_{rp}, \tilde{w}_{rp}, g_{\mu p}, \tilde{g}_{\mu p}, q_{rp}, \tilde{q}_{rp}, \delta_p\right)$. Относительные оценки RC_p^{RP} и RB_p^{RP} ресурсного потенциала объектов системы переработки распределяются в интервале (0;1], а оценки SC_p^{RP} и SB_p^{RP} ресурсного потенциала – в интервале (0; ∞). Объекты, получившие максимальные оценки SC_p^{RP} и SB_p^{RP}, являются наилучшими в анализируемой группе из P комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» с учетом постоянного и переменного эффекта масштаба соответственно.

1.4. ПОКАЗАТЕЛИ МАСШТАБИРОВАНИЯ

На четвертом этапе анализа (рис. 1) необходимо определить показатели масштабирования, которые используются в системе поддержки принятия решений.

В разделе 1.3 рассмотрены правила определения эффекта масштаба, который является качественной оценкой масштабных свойств объектов системы переработки НСО. Различают объекты с постоянным, убывающим и возрастающим эффектом масштаба. В соответствии с теорией метода DEA [15] объекты с постоянным эффектом масштаба имеют неизменное соотношение объема затраченных ресурсов к объему получаемых полезных углеводородов. Убывающий эффект масштаба соответствует объектам, в которых потенциальный получаемый объем углеводородов из НСО оказывается меньше затраченных на его переработку ресурсов. Возрастающий эффект масштаба соответствует объектам системы переработки отходов с потенциально большей отдачей полезных углеводородов с учетом того же объема затраченных ресурсов. Информация об эффекте масштаба может учитываться дополнительно при принятии управленческих решений.

Для определения оценки SE_p эффективности масштабирования p-й комбинации «хранилище НСО – технология переработки», которая демонстрирует влияние масштабных свойств технологических операций на эффективность переработки, необходимо использовать результаты решения ЗМП 2.1 и 3.1 соответственно в виде оценок RC_p^{RP} и RB_p^{RP} ресурсного потенциала [28]:

$$SE_p = \frac{RC_p^{RP}}{RB_p^{RP}} \Rightarrow RC_p^{RP} = RB_p^{RP} SE_p, \quad SE_p \le 1. \tag{9}$$

Если p-й объект сравнения обладает максимальным ресурсным потенциалом $\left(RC_p^{RP} = RB_p^{RP} = 1\right)$, то масштаб технологических операций не влияет на

процесс переработки отходов в хранилище и оценка эффективности масштабирования максимальна $SE_p = 1$.

Если $RB_p^{RP} < 1$, то источником неэффективности является низкая эффективность технологии переработки. При $SE_p < 1$ источником неэффективности является несоответствие масштаба технологических операций эффективности переработки НСО в хранилище.

Если p-й объект сравнения имеет максимальную оценку ресурсного потенциала соответствующей чистой технической эффективности переработки $\left(RB_p^{RP} = 1\right)$, но низкую оценку общей технической эффективности переработки $\left(RC_p^{RP} < 1\right)$, то он является локально эффективным без учета масштаба технологических операций.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Для апробации разработанной методики рассмотрим систему переработки НСО, находящуюся на территории Самарской области и включающую $N = 20$ хранилищ отходов и $T = 10$ технологий переработки, подробные характеристики которых представлены в [17]. В качестве объектов сравнения будут рассматриваться $P = 200$ возможных комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» (объектов сравнения). Расчеты для ЗМП 1.1, 1.2, 2.1, 2.2 проведены с помощью специализированного программного обеспечения [29], а для ЗМП 3.1, 3.2 – с использованием бесплатного программного обеспечения MaxDEA Basic [30].

Рассчитанные в [17] оценки S_j^{RV}, $j = \overline{1,20}$, ресурсной ценности НСО в 20 хранилищах анализируемой системы получены путем решения задач, аналогичных ЗМП 1.1 и 1.2 на первом этапе алгоритма (рис. 1).

В табл. 1 представлены статистические данные входных и выходных параметров для $p = \overline{1,200}$ комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» в соответствующих ЗМП (раздел 1.3) методом DEA на втором и третьем этапе алгоритма (рис. 1). Общий объем НСО в 20 хранилищах (общей площадью около 25 тыс. м^2), подлежащих переработке, составляет 69.337 тыс. тонн. Производительность 10 технологий в составе системы переработки варьируется от 1.5 до 50 тонн НСО в час. В технологических установках используется дизельное топливо или электрическая энергия, при этом расход реагентов и топлива (энергии) для проведения расчетов нормирован относительно стоимости дизельного топлива [17].

Из табл. 1 видно, что существует большой разброс по всем анализируемым параметрам, что указывает на неоднородность масштаба объектов системы и подтверждается наблюдением за стандартным отклонением, минимальными и максимальными значениями в выборке. Минимальное значение массы реагентов $(x_{2p} = 0)$ объясняется тем, что не все технологии используют реагенты в процессе переработки.

При анализе парных корреляционных зависимостей отдельно по каждой технологии в отношении переработки всех НСО в хранилищах для входных

x_{ip}, $i=\overline{1,3}$, и выходного параметра y_{1p} установлена сильная положительная связь (значение коэффициента корреляции Спирмена [31] для каждой из 10 технологий системы переработки составляет 0.94 при значимости на уровне 1 %). Это указывает на то, что масса получаемых углеводородов y_{1p} в основном зависит от изменения времени переработки и затраченных ресурсов $x_{ip}, i=\overline{1,3}$. Обоснование использования оценки ресурсной ценности $y_{2p}=S_j^{RV}$ в методе DEA и оценка ее влияния на ресурсный потенциал объектов системы приведены в [17]. Таким образом, считается, что входные и выходные параметры для оценки ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» в анализируемой системе переработки выбраны обоснованно.

Таблица 1

Table 1

Основные статистические данные входных и выходных параметров в задачах оценки ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки»

Basic statistical data of input and output parameters in the problems of assessing the resource potential of combinations "Oil-contaminated wastes storage – recycling technology"

Наименование параметра, ед. изм.	Время переработки НСО, ч	Масса реагентов, т	Расход энергии (топлива), т	Масса углеводородов, т	Оценка ресурсной ценности НСО
Обозначение в ЗМП	x_{1p}	x_{2p}	x_{3p}	y_{1p}	$y_{2p}=S_j^{RV}$
Минимальное	8.008	0	0.036	13.833	0.205
Максимальное	16301.13	57150.29	1589.36	4206.81	1.702
Среднее	711.86	968.72	46.33	508.87	0.574
Стандартное отклонение	1767.26	4628.49	157.41	758.85	0.357

В табл. 2 представлены статистические данные по оценкам RC_p^{RP}, SC_p^{RP}, RB_p^{RP}, SB_p^{RP} ресурсного потенциала объектов системы как результаты решения ЗМП 2.1, 2.2 и ЗМП 3.1, 3.2 соответственно, а также по оценке SE_p эффективности масштабирования.

Результаты в табл. 2 показывают, что неэффективность некоторых комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» достигает 98.6 %, что видно по значению минимальной оценки ресурсного потенциала по всем моделям метода DEA, равной 0.014. При этом доля полностью эффективных комбинаций без учета эффекта масштаба достигает 9.5 % (модель BCC), что свидетельствует о наличии эффективных технологий переработки. Этот факт подтверждается достаточно высоким средним значением оценки SE_p эффективности масштабирования, равным 88.2 %, что соответствует среднему уровню неэффективности 11.8 % объектов в системе переработки НСО.

В анализируемой системе переработки возрастающий эффект масштаба демонстрируют 73 % объектов, в то время как убывающий и постоянный 20.5 % и 6.5 % объектов соответственно (рис. 2).

Таблица 2

Table 2

Основные статистические данные по оценкам ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» с учетом постоянного и переменного эффекта масштаба методом DEA

Basic statistical data for assessing the resource potential of combinations "Oil-contaminated wastes storage – recycling technology" taking into account constant and variable scale effects by the DEA method

Наименование оценки	Оценки ресурсного потенциала объектов системы с постоянным эффектом масштаба		Оценки ресурсного потенциала объектов системы с переменным эффектом масштаба		Оценка эффективности масштабирования
Модель метода DEA, формулы	CCR, (1)–(2)	Super-efficiency, (3)–(4)	BCC, (5)–(6)	Super-efficiency, (7)–(8)	– (9)
Номер ЗМП	2.1	2.2	3.1	3.2	–
Обозначение	RC_p^{RP}	SC_p^{RP}	RB_p^{RP}	SB_p^{RP}	SE_p
Минимальная	0.014	0.014	0.014	0.014	0.365
Максимальная	1	1.322	1	9.529	1
Средняя	0.481	0.493	0.547	0.756	0.882
Стандартное отклонение	0.302	0.325	0.324	1.179	0.149
Доля эффективных комбинаций с оценкой ≥1, %	6.5	6.5	9.5	9.5	6.5

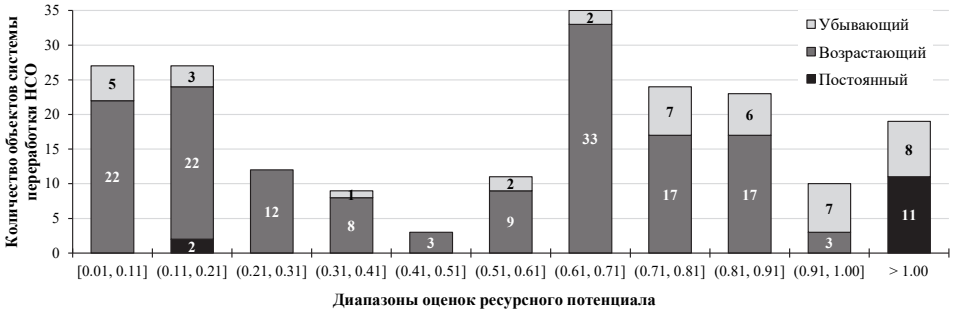


Рис. 2. Распределение объектов системы переработки НСО по диапазонам оценок SB_p^{RP} ресурсного потенциала с переменным эффектом масштаба

Fig. 2. Distribution of objects of the oil-contaminated waste recycling system by ranges of resource potential estimates SB_p^{RP} with variable scale effects

Средняя оценка RB_p^{RP} ресурсного потенциала по модели ВСС (чистая техническая эффективность) в анализируемой системе составляет 54.7 %. Это указывает на то, что затраты времени и ресурсов на переработку могут быть снижены на 45.3 % при неизменных объеме получаемых углеводородов и оценке S_j^{RV} ресурсной ценности в хранилищах. Однако этот вывод для предлагаемого подхода является неверным, так как в качестве объектов в системе переработки НСО рассматриваются все возможные комбинации «хранилище НСО – технология переработки», что является обоснованным с точки зрения полноты охвата возможных вариантов и высокой точности получения сравнительной оценки ресурсного потенциала, но недостаточным для принятия конкретных управляющих решений, потому что невозможно переработать НСО в хранилищах несколько раз разными технологиями.

Для устранения обнаруженного противоречия предлагается рассмотреть решение и сравнить результаты двух оптимизационных задач по выбору в системе переработки эффективных комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» по критерию повышения ресурсного потенциала. Решение первой задачи основано на ранжировании оценок SC_p^{RP} ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» с учетом постоянного эффекта масштаба и выборе из них максимальных, определяющих последовательность № 1 хранилищ НСО, подлежащих переработке соответствующими технологиями (табл. 3). При этом ограничение на повторное использование технологии не применяется. Аналогичным образом решается вторая задача на основе ранжирования оценок SB_p^{RP} ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» с учетом переменного эффекта масштаба (табл. 4), определяющая последовательность № 2 переработки НСО. Полученные в ходе решения этих задач оптимальные последовательности № 1 и № 2 позволяют полностью переработать НСО в хранилищах анализируемой системы с различной эффективностью масштабирования, затратами и качеством.

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что вариативность применения технологий переработки НСО достаточно невысокая: последовательность № 1 (табл. 3) включает три (n = 2, 8, 9) технологии, а последовательность № 2 (табл. 4) – четыре (n = 2, 8, 7, 9). Большинство НСО планируется переработать с использованием технологии n = 8: в последовательности № 1 – 17 хранилищ, в последовательности № 2 – 14 хранилищ. Анализируя эффект масштаба, можно констатировать, что количество комбинаций с постоянным эффектом масштаба в обеих последовательностях совпадает и равно 2. В последовательности № 1 количество комбинаций с возрастающим эффектом масштаба равно 10, с убывающим – 8. В последовательности № 2 количество комбинаций с возрастающим и убывающим эффектом масштаба распределено поровну – по 9.

Таблица 3

Table 3

Оптимальная последовательность № 1 комбинаций с учётом постоянного эффекта масштаба

Optimal sequence No. 1 of combinations based on a constant effect of scale

Номер комбинации	Номер хранилища НСО	Номер технологии	Оценки ресурсного потенциала объектов системы				Оценка эффективности масштабирования	Эффект масштаба
			с постоянным эффектом масштаба		с переменным эффектом масштаба			
p	j	n	RC_p^{RP}	SC_p^{RP}	RB_p^{RP}	SB_p^{RP}	SE_p	
152	16	2	1	**1.322**	1	1.954	1	Постоянный
109	11	9	1	**1.186**	1	2.745	1	Постоянный
179	18	9	0.975	**0.975**	0.978	0.978	0.997	Убывающий
198	20	8	0.897	**0.897**	0.924	0.924	0.971	Убывающий
128	13	8	0.885	**0.885**	0.886	0.886	0.999	Убывающий
88	9	8	0.882	**0.882**	0.889	0.889	0.992	Убывающий
148	15	8	0.837	**0.837**	0.844	0.844	0.991	Убывающий
58	6	8	0.835	**0.835**	0.838	0.838	0.996	Убывающий
78	8	8	0.830	**0.830**	0.841	0.841	0.987	Убывающий
168	17	8	0.818	**0.818**	0.924	0.924	0.885	Возрастающий
118	12	8	0.811	**0.811**	0.829	0.829	0.979	Возрастающий
68	7	8	0.805	**0.805**	0.814	0.814	0.989	Возрастающий
98	10	8	0.789	**0.789**	0.813	0.813	0.970	Возрастающий
18	2	8	0.782	**0.782**	0.819	0.819	0.955	Возрастающий
188	19	8	0.781	**0.781**	0.811	0.811	0.963	Возрастающий
138	14	8	0.779	**0.779**	0.793	0.793	0.982	Возрастающий
28	3	8	0.770	**0.770**	0.838	0.838	0.919	Убывающий
48	5	8	0.770	**0.770**	0.783	0.783	0.982	Возрастающий
38	4	8	0.770	**0.770**	0.778	0.778	0.990	Возрастающий
8	1	8	0.770	**0.770**	0.777	0.777	0.990	Возрастающий
Сумма			**16.78**	**17.29**	**17.18**	**19.88**	**19.54**	–

Для анализируемой системы переработки НСО учет эффекта масштаба при принятии управленческих решений может использоваться в случае, если требуется получить максимальный объем полезных углеводородов и общее время переработки отходов в системе не ограничено. Тогда в первую очередь следует перерабатывать НСО, входящие в комбинации «хранилище НСО – технология переработки» с убывающим эффектом масштаба, так как при потенциальном увеличении объема НСО в таких хранилищах будет наблюдаться снижение соответствующего объема полезных углеводородов после переработки. Во вторую очередь следует перерабатывать НСО из комбинаций с постоянным эффектом масштаба, потому что они не зависят от временного

фактора и затраченные ресурсы на переработку пропорциональны получаемому объему полезных углеводородов. Переработку НСО из хранилищ, входящих в комбинации с возрастающим эффектом масштаба, следует отложить, и рекомендуется продолжить накапливать в них отходы, чтобы иметь потенциальную возможность увеличения объема полезных углеводородов после переработки.

Таблица 4

Table 4

Оптимальная последовательность № 2 комбинаций с учетом постоянного эффекта масштаба

Optimal sequence No. 2 of combinations based on a variable effect of scale

Номер комбинации	Номер хранилища НСО	Номер технологии	Оценки ресурсного потенциала объектов системы				Оценка эффективности масштабирования	Эффект масштаба
			с постоянным эффектом масштаба		с переменным эффектом масштаба			
p	j	n	RC_p^{RP}	SC_p^{RP}	RB_p^{RP}	SB_p^{RP}	SE_p	
102	11	2	1	1.140	1	**9.529**	1	Постоянный
22	3	2	0.397	0.397	1	**9.529**	0.397	Убывающий
152	16	2	1	1.322	1	**1.954**	1	Постоянный
178	18	8	0.940	0.940	0.994	**0.994**	0.946	Убывающий
198	20	8	0.897	0.897	0.924	**0.924**	0.971	Убывающий
168	17	8	0.818	0.818	0.924	**0.924**	0.885	Возрастающий
129	13	9	0.737	0.737	0.918	**0.918**	0.803	Возрастающий
88	9	8	0.882	0.882	0.889	**0.889**	0.992	Убывающий
148	15	8	0.837	0.837	0.844	**0.844**	0.991	Убывающий
78	8	8	0.830	0.830	0.841	**0.841**	0.987	Убывающий
58	6	8	0.835	0.835	0.838	**0.838**	0.996	Убывающий
118	12	8	0.811	0.811	0.829	**0.829**	0.979	Возрастающий
18	2	8	0.782	0.782	0.819	**0.819**	0.955	Возрастающий
68	7	8	0.805	0.805	0.814	**0.814**	0.989	Возрастающий
98	10	8	0.789	0.789	0.813	**0.813**	0.970	Возрастающий
188	19	8	0.781	0.781	0.811	**0.811**	0.963	Возрастающий
7	1	7	0.623	0.623	0.803	**0.803**	0.776	Убывающий
37	4	7	0.623	0.623	0.796	**0.796**	0.783	Убывающий
138	14	8	0.779	0.779	0.793	**0.793**	0.982	Возрастающий
48	5	8	0.770	0.770	0.783	**0.783**	0.982	Возрастающий
Сумма			**15.93**	**16.40**	**17.43**	**35.44**	**18.35**	–

Таким образом, последовательность № 1 (см. табл. 3) обладает потенциально большими возможностями по извлечению из НСО полезных углеводородов за счет большего количества комбинаций с возрастающим эффектом масштаба.

Суммарные показатели по анализируемым параметрам показывают, что последовательность № 1 позволяет переработать все НСО в хранилищах быстрее на 96.13 % и с меньшими в 14.5 раза затратами топлива (энергии) по сравнению с последовательностью № 2, которая, в свою очередь, позволяет получить углеводородов больше на 162.17 % и затратить в 2.24 раза меньше реагентов. В итоге результаты анализа по статистике использования технологий, эффекту масштаба, затраченным ресурсам и полученному результату не позволяют однозначно определить лучшую из рассматриваемых последовательностей № 1 и № 2, и для принятия обоснованных управленческих решений в системе переработки НСО требуется учитывать масштабные показатели.

Сравнивая статистические данные параметров объектов системы переработки НСО (табл. 5), можно увидеть, что в последовательности № 1 средняя неэффективность масштабирования в комбинациях составляет только 2.3 % против 8.3 % у последовательности № 2, при этом стандартное отклонение оценки SE_p эффективности масштабирования у последовательности № 2 выше, чем у последовательности № 1 (0.143 против 0.029 соответственно). Таким образом, выбор для переработки последовательности № 1 по совокупности масштабных показателей (большее количество комбинаций с возрастающим эффектом масштаба и средняя оценка эффективности масштабирования) является наилучшим решением среди анализируемых вариантов.

Таблица 5

Table 5

Основные статистические данные оптимальных последовательностей комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» по критерию повышения ресурсного потенциала с учетом постоянного и переменного эффекта масштаба

The main statistical data of the optimal sequences of combinations “Oil-contaminated wastes storage – recycling technology” according to the criterion of increasing the resource potential, taking into account constant and variable scale effect

Наименование оценки	Оценки ресурсного потенциала объектов системы с постоянным эффектом масштаба		Оценки ресурсного потенциала объектов системы с переменным эффектом масштаба		Оценка эффективности масштабирования
Обозначение	RC_p^{RP}	SC_p^{RP}	RB_p^{RP}	SB_p^{RP}	SE_p
Оптимальная последовательность № 1					
Минимальная	0.770	0.770	0.777	0.777	0.885
Максимальная	1	1.322	1	2.745	1
Средняя	0.839	0.864	0.859	0.994	0.977
Стандартное отклонение	0.077	0.145	0.072	0.484	0.029
Оптимальная последовательность № 2					
Минимальная	0.397	0.397	0.783	0.783	0.397
Максимальная	1	1.322	1	9.529	1
Средняя	0.797	0.820	0.872	1.772	0.917
Стандартное отклонение	0.136	0.185	0.078	2.665	0.143

Подводя итог анализа, можно сделать вывод о том, что учет эффекта масштаба и средней оценки эффективности масштабирования позволяет обосновать принятие управленческих решений в системе переработки НСО, если другие показатели переработки являются неочевидными или неоднозначными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенной работы разработан алгоритм определения оценок ресурсного потенциала комбинаций «хранилище НСО – технология переработки» и принятия управленческих решений с учетом показателей масштабирования. Приведена математическая постановка ЗМП по моделям CCR, BCC и Super-efficiency метода DEA, решение которых позволяет получить оценки ресурсного потенциала объектов системы переработки, ранжировать их и определить наилучшие комбинации «хранилище НСО – технология переработки» с учетом постоянного и переменного эффекта масштаба. Показан способ определения эффекта масштаба в модели BCC и расчета оценки эффективности масштабирования, которые позволяют дополнительно обосновывать принимаемые управленческие решения.

На примере системы переработки НСО Самарской области представлены анализ исходных параметров и результатов расчета оценок ресурсного потенциала объектов на основе статистических данных и последовательность принятия обоснованных управленческих решений по переработке с учетом показателей масштабирования. Разработанный подход может быть распространен на системы переработки отходов в других регионах Российской Федерации.

Направление дальнейших исследований по этой тематике может включать рассмотрение эластичности масштабирования в качестве количественного показателя эффекта масштаба и проведение сравнительного анализа результатов решения оптимизационных задач по повышению ресурсного потенциала объектов системы переработки НСО с учетом ограничений на общее время процесса и использование технологий, параллельной переработки отходов и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Окружающая среда. Отходы производства и потребления: официальная статистика // Федеральная служба государственной статистики РФ: сайт. – URL: https://rosstat.gov.ru/folder/11194 (дата обращения: 29.08.2023).

2. СП 2.1.7.1386-03. Санитарные правила по определению класса опасности токсичных отходов производства и потребления.

3. *Крапивский Е.И.* Нефтешламы: уничтожение, утилизация, дезактивация. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 432 с.

4. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. – М.: Минприроды России: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2022. – 684 с.

5. ГОСТ Р 56828.43–2018. Наилучшие доступные технологии. Утилизация и обезвреживание нефтесодержащих отходов. Показатели для идентификации. – М.: Стандартинформ, 2018.

6. *Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S.* A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems // Journal of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 114. – P. 11–32. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007.

7. Comprehensive characterization of an oily sludge from a petrol refinery: A step forward for its valorization within the circular economy strategy / S. Jerez, M. Ventura, R. Molina, M.I. Pariente, F. Martínez, J.A. Melero // Journal of Environmental Management. – 2021. – Vol. 285. – P. 112124. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112124.

8. Circular economy potential and contributions of petroleum industry sludge utilization to environmental sustainability through engineered processes – A review / A.H. Jagaba, S.R.M. Kutty, I.M. Lawal, A.H. Birniwa, A.C. Affam, N.S.A. Yaro, A.K. Usman, I. Umaru, S. Abubakar, A. Noor, U.B. Soja, A.S. Yakubu // Cleaner and Circular Bioeconomy. – 2022. – Vol. 3. – P. 100029. – DOI: 10.1016/j.clcb.2022.100029.

9. *Мазлова Е.А., Мещеряков С.В.* Проблемы утилизации нефтешламов и способы их переработки. – М.: Ноосфера, 2001. – 56 с. – EDN YOLGSO.

10. Отходы нефтегазового комплекса в дорожном строительстве / Г.Г. Ягафарова, А.Х. Сафаров, А.В. Московец, Л.Р. Акчурина, Ю.А. Федорова, Д.Х. Акчурина // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2014. – № 8. – С. 9–11. – EDN SJMXVV.

11. *Тимрот С.Д., Гурылёва Н.Л., Яманина Н.С.* Использование нефтесодержащих отходов в производстве керамзита // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2010. – Т. 53, № 5. – С. 117–118. – EDN OWYJTV.

12. *Яковлев С.И.* Создание экотехнопарка по безотходной утилизации нефтесодержащих отходов с получением технического грунта и котельных (печных) топлив // Экологический вестник России. – 2020. – № 4. – С. 18–20. – EDN IKWCNK.

13. *Ефимова С.Б.*, *Калинина Е.В.* Оценка возможности использования остатков после пиролиза нефтесодержащих отходов в производстве керамических изделий // Химия. Экология. Урбанистика. – 2020. – Т. 1. – С. 83–87. – EDN BXEEKW.

14. *Цокур О.С.* Повышение ресурсосбережения утилизацией нефтесодержащих отходов реагентным способом с получением экологически безопасных продуктов: автореф. дис. … канд. техн. наук: 03.02.08. – Краснодар, 2015. – 22 с. – EDN ZPOYPL.

15. *Ратнер С.В.* Практические приложения анализа среды функционирования (Data Envelopment Analysis) к решению задач экологического менеджмента. – М.: Инфра-М, 2020. – 231 с. – (Научная мысль). – ISBN 978-5-16-015288-2. – EDN JWZFUS.

16. Simulation and multi-objective evaluation of reuse potential of waste recycling system for oil and gas industry / M. Derevyanov, Y. Pleshivtseva, A. Afinogentov, A. Mandra, A. Pimenov // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). – Samara, 2019. – P. 429–434. – DOI: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976783. – EDN ONLVML.

17. *Деревянов М.Ю.*, *Плешивцева Ю.Э.* Анализ ресурсной ценности и ресурсного потенциала объектов системы переработки нефтесодержащих отходов на основе DEA-метода // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2022. – № 4 (216). – С. 27–34. – DOI: 10.17213/1560-3644-2022-4-27-34. – EDN QJNFRG.

18. *Dellnitz A, Rödder W*. Returns to scale as an established scaling indicator: always a good advisor? // Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik. – 2021. – Vol. 241 (2). – P. 173–186. – DOI: 10.1515/jbnst-2019-0058.

19. Examination on level of scale efficiency in public hospitals in Tanzania / F. Fumbwe, R. Lihawa, F. Andrew, G. Kinyanjui, E. Mkuna // Cost Effectiveness and Resource Allocation. – 2021. – Vol. 19. – Art. 49. – DOI: 10.1186/s12962-021-00305-4.

20. Оценка ресурсного потенциала тяжелых нефтяных остатков на основе DEA-метода / П.М. Тюкилина, П.Е. Красников, М.Ю. Деревянов, А.А. Пименов, Ю.Э. Плешивцева // Нефтехимия. – 2019. – Т. 59, № 6. – С. 652–658. – DOI: 10.1134/S0028242119060145. – EDN OUBWQL.

21. Effect of scale on water users' associations' performance in Tunisia: nonparametric model for scale elasticity calculation / A. Frija, J. Buysse, S. Speelman, A. Chebil, G. Van Huylenbroeck // 2010 AAAE Third Conference/AEASA 48th Conference, September 19–23, 2010. – Cape Town, South Africa, 2010. – DOI: 10.22004/ag.econ.95982. – URL: https://ideas.repec.org/p/ags/aaae10/95982.html (accessed: 29.08.2023).

22. *Плешивцева Ю.Э., Казаринов А.В., Деревянов М.Ю.* Многофакторный анализ процессов производства дорожных битумов путем окисления продуктов нефтепереработки // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2021. – Т. 29, № 3 (71). – С. 52–66. – DOI: 10.14498/tech.2021.3.3. – EDN QYHQKK.

23. Using DEA models to measure the efficiency of energy saving projects / M.Y. Derevyanov, Y.E. Pleshivtseva, L.S. Kordyukova, A.V. Rapoport // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 552. – P. 012020. – DOI: 10.1088/1757-899X/552/1/012020.

24. *Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E.* Measuring the efficiency of decision-making units // European Journal of Operation Research. – 1978. – Vol. 6 (2). – P. 429–444.

25. *Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W.* Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis // Management Science. – 1984. – Vol. 30 (9). – P. 1078–1092.

26. *Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K.* Super-efficiency models // Data envelopment analysis. – New York: Springer, 2007. – DOI: 10.1007/978-0-387-45283-8_10.

27. Сравнительная оценка ресурсной ценности объектов хранения нефтесодержащих отходов на основе DEA-метода / Ю.Э. Плешивцева, М.Ю. Деревянов, Д.В. Каширских, А.А. Пименов, А.В. Керов, В.К. Тян // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 11. – С. 139–144. – DOI: 10.24887/0028-2448-2018-11-139-144. – EDN YPXNTN.

28. *Лисситса А., Бабичева Т.* Анализ оболочки данных (DEA) – современная методика определения эффективности производства // Discussion Paper. Institute of Agricultural Development in Central and Eastern Europe. – 2003. – N 50. – URL: http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:3:2-23263 (accessed: 29.08.2023).

29. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669216 Российская Федерация. Многокритериальная оптимизация комплексной переработки нефтесодержащих отходов по системным критериям качества: № 2022669013: заявл. 18.10.2022: опубл. 18.10.2022 / Ю.Э. Плешивцева, А.А. Афиногентов, М.Ю. Деревянов, А.Г. Мандра, А.А. Пименов; заявитель Самарский государственный технический университет. – EDN NXBOFR.

30. MaxDEA 8 Basic: Free DEA software. – URL: http://maxdea.com/MaxDEA.htm (accessed: 29.08.2023).

31. *Глинский В.В.,* Ионин В.Г. Статистический анализ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Филинъ, 1998. – 264 с. – ISBN 5-89568-089-5. – EDN RBDWUL.

Деревянов Максим Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет». Основное направление исследований – системный анализ, управление, обработка информации и автоматизация технологических процессов и производств. Имеет более 60 печатных работ. E-mail: mder2007@mail.ru.

Derevyanov Maksim Y., PhD (Eng.), associate professor at the Control and System Analysis of Thermal Power and Sociotechnical Complexes Department in the Samara State Technical University. The main field of his scientific research is system analysis, management, information processing and automation of technological processes and productions. Has more than 60 printed works. E-mail: mder2007@mail.ru.

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-47-68

Analysis of scaling indicators when assessing the resource potential of objects of the oil-contaminated waste recycling system based on the DEA method *

M.YU. DEREVYANOV

Samara State Technical University, 244 Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russian Federation

mder2007@mail.ru

Abstract

The paper proposes a new approach to assessing the resource potential of the objects of the oil-contaminated waste (OCW) recycling system based on the Data Envelopment Analysis (DEA) method, taking into account the constant and variable economies of scale, and a comparative analysis of the scaling indicators used in selecting the best facilities of the OCW recycling system in making informed managerial decisions. A four-stage calculation algorithm has been developed, in which the first stage determines estimates of the resource value of OCW in storage facilities. At the second and third stages, estimates of the resource potential of combinations of "OCW storage - recycling technology" are calculated taking into account constant and variable economies of scale, respectively, as well as the effect of scale (constant, increasing or decreasing), which characterizes the qualitative assessment of the scale properties of objects of the OCW recycling system. At the fourth stage, an assessment of the effectiveness of scaling, which characterizes the magnitude of the impact of scale of technological operations on the efficiency of OCW recycling in the analyzed system, and the optimal sequence of processing of OCW in storages by the criterion of increasing the resource potential of the system objects, taking into account indicators of scaling, is determined.

By the example of the system of OCW recycling in the Samara region estimates of resource value of OCW in storages, assessment of resource potential of combinations "OCW storage – recycling technology" and corresponding indicators of scaling (effect of scale and evaluation of scaling efficiency) have been calculated. The comparison of two optimal sequences by the criterion of increasing the resource potential of the system objects, taking into account constant and variable economies of scale was made, and it is shown how the indicators of scaling can influence the adoption of sound management decisions.

Keywords: oil-contaminated waste, recycling system, technology, resource potential, resource value, scale effect, scaling efficiency, Data Envelopment Analysis

REFERENCES

1. *Okruzhayushchaya sreda. Otkhody proizvodstva i potrebleniya* [Production and consumption waste, environment]. *Federal State Statistics Service of the Russian Federation*. Website. (In Russian). Available at: https://rosstat.gov.ru/folder/11194 (accessed 29.08.2023).

2. SP 2.1.7.1386-03. *Sanitarnye pravila po opredeleniyu klassa opasnosti toksichnykh otkhodov proizvodstva i potrebleniya* [Sanitary rules for determining the hazard class of toxic waste of production and consumption].

3. Krapivskii E.I. *Nefteshlamy: unichtozhenie, utilizatsiya, dezaktivatsiya* [Oil sludge: destruction, recycling, decontamination]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2021. 432 p.

* *Received 26 June 2023.*

4. *O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2021 godu* [On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2021]. State report. Moscow, Ministry of Natural Resources of Russia Publ., Lomonosov Moscow State University Publ., 2022. 684 p.

5. GOST R 56828.43–2018. *Nailuchshie dostupnye tekhnologii. Utilizatsiya i obezvrezhivanie neftesoderzhashchikh otkhodov. Pokazateli dlya identifikatsii* [State Standard R 56828.43–2018. Best available techniques. Recycling and disposal of oily waste. Indicators to identify]. Moscow, Standartinform Publ., 2018.

6. Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 114, pp. 11–32. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007.

7. Jerez S., Ventura M., MolinaR., Pariente M.I., Martínez F., Melero J.A. Comprehensive characterization of an oily sludge from a petrol refinery: A step forward for its valorization within the circular economy strategy. *Journal of Environmental Management*, 2021, Vol. 285, p. 112124. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112124.

8. Jagaba A.H., Kutty S.R.M., Lawal I.M., Birniwa A.H., Affam A.C., Yaro N.S.A., Usman A.K., Umaru I., Abubakar S., Noor A., Soja U.B., Yakubu A.S. Circular economy potential and contributions of petroleum industry sludge utilization to environmental sustainability through engineered processes – A review. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 2022, vol. 3, p. 100029. DOI: 10.1016/j.clcb.2022.100029.

9. Mazlova E.A., Meshcheryakov S.V. *Problemy utilizatsii nefteshlamov i sposoby ikh pererabotki* [Problems of oil sludge disposal and methods of their processing]. Moscow, Noosfera Publ., 2001. 56 p.

10. Yagafarova G.G., Safarov A.Kh., Moskovets A.V., Akchurina L.R., Fedorova Yu.A., Akchurina D.Kh. Otkhody neftegazovogo kompleksa v dorozhnom stroitel'stve [Waste oil and gas complex in road construction]. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse = Environmental Protection in Oil and Gas Complex*, 2014, no. 8, pp. 9–11.

11. Timrot S.D., Guryleva N.L., Yamanina N.S. Ispol'zovanie neftesoderzhashchikh otkhodov v proizvodstve keramzita [The use of oil-containing waste in the production of expanded clay]. *zvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology*, 2010, vol. 53, no. 5, pp. 117–118.

12. Yakovlev S.I. Sozdanie ekotekhnoparka po bezotkhodnoi utilizatsii neftesoderzhashchikh otkhodov s polucheniem tekhnicheskogo grunta i kotel'nykh (pechnykh) topliv [Creation of ecotechnopark for non-waste disposal of oily waste with obtaining technical soil and boiler (furnace) fuels]. *Ekologicheskii vestnik Rossii = Environmental bulletin of Russia*, 2020, no. 4, pp. 18–20.

13. Efimova S.B., Kalinina E.V. Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya ostatkov posle piroliza neftesoderzhashchikh otkhodov v proizvodstve keramicheskikh izdelii [Evaluation of the use of residues after pyrolysis of oily waste in the production of ceramic products]. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika = Chemistry. Ecology. Urbanistics*, 2020, vol. 1, pp. 83–87.

14. Tsokur O.S. *Povyshenie resursosberezheniya utilizatsiei neftesoderzhashchikh otkhodov reagentnym sposobom s polucheniem ekologicheski bezopasnykh produktov*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Increase of resource saving by recycling oily waste by reagent method with obtaining environmentally safe products. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Krasnodar, 2015. 22 p.

15. Ratner S.V. *Prakticheskie prilozheniya analiza sredy funktsionirovaniya (Data Envelopment Analysis) k resheniyu zadach ekologicheskogo menedzhmenta* [Practical applications of Data Envelopment Analysis to environmental management problems]. Moscow, Infra-M Publ., 2020. 231 p. ISBN 978-5-16-015288-2.

16. Derevyanov M., Pleshivtseva Y., Afinogentov A., Mandra A., Pimenov A. Simulation and multi-objective evaluation of reuse potential of waste recycling system for oil and gas industry. *2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)*, Samara, 2019, pp. 429–434. DOI 10.1109/CSCMP45713.2019.8976783.

17. Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E. Analiz resursnoi tsennosti i resursnogo potentsiala ob"ektov sistemy pererabotki neftesoderzhashchikh otkhodov na osnove DEA-metoda [Analysis of the resource value and resource potential of the objects of the system of oil-contaminated waste processing based on DEA-method]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Tekhni-*

cheskie nauki = University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series, 2022, no. 4 (216), pp. 27–34. DOI: 10.17213/1560-3644-2022-4-27-34.

18. *Dellnitz A, Rödder W*. Returns to scale as an established scaling indicator: always a good advisor? *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik*, 2021, vol. 241 (2), pp. 173–186. DOI: 10.1515/jbnst-2019-0058.

19. Fumbwe F., Lihawa R., Andrew F., Kinyanjui G., Mkuna E. Examination on level of scale efficiency in public hospitals in Tanzania. *Cost Effectiveness and Resource Allocation*, 2021, vol. 19, art. 49. DOI: 10.1186/s12962-021-00305-4.

20. Tyukilina P.M., Krasnikov P.E., Derevyanov M.Yu., Pimenov A.A., Pleshivtseva Yu.E. Assessment of resource potential of heavy petroleum residues by data envelopment analysis. *Petroleum Chemistry*, 2019, vol. 59, no. 11, pp. 1207–1212. DOI: 10.1134/S0965544119110148. Translated from *Neftekhimiya*, 2019, vol. 59, no. 6, pp. 652–658. DOI: 10.1134/S0028242119060145.

21. Frija A., Buysse J., Speelman S., Chebil A., Van Huylenbroeck G. Effect of scale on water users' associations' performance in Tunisia: nonparametric model for scale elasticity calculation. *2010 AAAE Third Conference/AEASA 48th Conference*, September 19–23, 2010, – Cape Town, South Africa, 2010. DOI: 10.22004/ag.econ.95982.

22. Pleshivtseva Yu.E., Kazarinov A.V., Derevyanov M.Yu. Mnogofaktornyi analiz protsessov proizvodstva dorozhnykh bitumov putem okisleniya produktov neftepererabotki [Multivariate analysis of road bitumen production processes by oxidation of oil products]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2021, vol. 29, no. 3 (71), pp. 52–66. DOI: 10.14498/tech.2021.3.3.

23. Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E., Kordyukova L.S., Rapoport A.V. Using DEA models to measure the efficiency of energy saving projects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 552, p. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/552/1/012020.

24. Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E. Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operation Research*, 1978, vol. 6 (2), pp. 429–444.

25. *Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W.* Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 1984, vol. 30 (9), pp. 1078–1092.

26. Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K. Super-efficiency models. *Data envelopment analysis*. New York, Springer, 2007. DOI: 10.1007/978-0-387-45283-8_10.

27. Pleshivtseva Yu.E., Derevyanov M.Yu., Kashirskikh D.V., Pimenov A.A., Kerov A.V., Tyan V.K. Sravnitel'naya otsenka resursnoi tsennosti ob"ektov khraneniya neftesoderzhashchikh otkhodov na osnove DEA-metoda [Comparative evaluation of the reuse value of storage for oil-contaminated waste based on DEA method]. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*, 2018, no. 11, pp. 139–144. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-11-139-144.

28. Lissitsa A., Babiéceva T. The Data Envelopment Analysis (DEA) for determining the efficiency of a production. *Discussion Paper. Institute of Agricultural Development in Central and Eastern Europe*, 2003, no. 50. (In Russian). Available at: http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:3:2-23263 (accessed 29.08.2023).

29. Pleshivtseva Yu.E., Afinogentov A.A., Derevyanov M.Yu., Mandra A.G., Pimenov A.A. *Mnogokriterial'naya optimizatsiya kompleksnoi pererabotki neftesoderzhashchikh otkhodov po sistemnym kriteriyam kachestva* [Multi-criteria optimization of the complex processing of oily waste according to system quality criteria]. The Certificate on official registration of the computer program RF. No. 2022669216, 2022.

30. *MaxDEA 8 Basic: Free DEA software*. Available at: http://maxdea.com/MaxDEA.htm (accessed 29.08.2023).

31. Glinskiy V.V., Ionin V.G. *Statisticheskii analiz* [Statistical analysis]. 2nd ed., rev. Moscow, Filin Publ., 1998. 264 p. ISBN 5-89568-089-5.

Для цитирования:

Деревянов М.Ю. Анализ показателей масштабирования при оценке ресурсного потенциала объектов системы переработки нефтесодержащих отходов на основе метода DEA // Системы анализа и обработки данных. – 2023 – № 3 (91). – С. 47–68. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-47-68.

For citation:

Derevyanov M.Yu. Analiz pokazatelei masshtabirovaniya pri otsenke resursnogo poten-tsiala ob"ektov sistemy pererabotki neftesoderzhashchikh otkhodov na osnove metoda DEA [Analysis of scaling indicators when assessing the resource potential of objects of the oil-contaminated waste recycling system based on the DEA method]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 3 (91), pp. 47–68. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-47-68.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 91, № 3, 2023, с. 69–86

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 91, No. 3, 2023, pp. 69–86

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 551.501.816; 551.510.411 DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-69-86

Применение нейронных сетей для классификации объектов в видеоданных в задачах автоматического мониторинга состояния биологических объектов*

Е.А. ЧЕРКАШИН

199178, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук»

egor@cea7.ru

Устойчивая тенденция к развитию технологий в быту и промышленности ведет к их постоянному усложнению, к внедрению новых разработок и методов, появляются новые способы получения и обработки информации. Неотъемлемой частью повседневной жизни стали системы видеонаблюдения. Камеры установлены на многоквартирных домах, в общественных местах, даже в квартирах и частных домах. Одной из наиболее важных областей, где компьютерное зрение нашло значительное применение, является наблюдение за биологическими объектами и анализ их поведения и состояния, особенно в контексте охраны природы и автоматизации исследований поведения животных. С ростом качества и количества видеоматериалов становится актуальной проблема точных и эффективных методов классификации объектов в реальном времени, особенно когда речь идет об автоматическом мониторинге состояния животных.

В настоящей работе описаны основные виды распознавания объектов, рассмотрены популярные современные архитектуры нейронных сетей, проведен сравнительный анализ некоторых из них применительно к решаемой задаче. В ходе работы с использованием методов дополнительной обработки и аннотаторов изображений SuperVisely и VGG Image Annotator сформирован датасет с более чем тысячей уникальных изображений для извлечения релевантных характеристик объектов, а также проведены экспериментальные исследования качества распознавания объектов на видео с помощью предобученных известных нейросетевых моделей. Определены и сформулированы требования к исходным данным для эффективного решения задачи автоматического мониторинга и прогнозирования состояния биологических объектов. Показано, что во избежание появления слепых зон в месте обитания животных необходимо использовать достаточно большое количество камер, размещенных с перекрытием исследуемого пространства, чтобы объекты мониторинга были постоянно в поле видимости. Это позволит

* *Статья получена 15 июня 2023.*

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 23-19-20081, https://rscf.ru/project/23-19-20081/ и Санкт-Петербургского научного фонда.

впоследствии составить общую картину высокого разрешения, составленную из изображений всех камер, а по полученной картине осуществлять классификацию объектов посредством искусственных нейронных сетей.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, компьютерное зрение, нейросетевое прогнозирование, датасет изображений, аугментация данных, классификация изобрежений, локализация объектов, сегментация областей, аннтотирование видеоданных

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время нейронные сети используются во многих отраслях промышленности для решения сложных задач, которые ранее было трудно или невозможно решить традиционными методами. Одной из областей, где нейросетевое управление показало большие перспективы, является область прогнозного моделирования, где искусственные нейронные сети (ИНС) используются для прогнозирования результатов работы сложных систем.

Одним из наиболее интересных применений ИНС является область компьютерного зрения, где нейронные сети используются для анализа изображений и видеоданных. В последние годы методы компьютерного зрения используются для прогнозирования состояния биологических объектов, таких как растения, животные и даже люди [1]. Например, компания Cattle Care использует методы компьютерного зрения и ИНС для отслеживания жизненного цикла КРС [2].

Существует множество преимуществ прогнозирования биологических состояний с помощью ИНС. Например, ИНС предоставляют исследователям и врачам информацию о состоянии пациента в режиме реального времени, что позволяет проводить более своевременное и целенаправленное лечение [3]. ИНС также можно использовать для выявления биомаркеров, которые могут быть использованы для предсказания начала заболевания до появления симптомов, что позволяет проводить более раннюю диагностику и лечение [4, 5].

В сельском хозяйстве ИНС находят применение для увеличения точности прогнозирования состояния урожая, для расчета необходимых удобрений и пестицидов [6, 7]. Необходимо отметить, что наиболее развито использование современных информационных технологий, включающих методы искусственного интеллекта и ИНС, в точном растениеводстве, а в точном животноводстве цифровизация отрасли несколько отстает, при этом возникают правовые проблемы использования методов искусственного интеллекта [8, 9].

Целью настоящей статьи является исследование точной и эффективной модели для классификации и прогнозирования здоровья крупного рогатого скота (КРС) в режиме реального времени при разработке интеллектуальной системы видеомониторинга. Большое внимание уделяется модели, способной классифицировать различные аспекты поведения крупного рогатого скота, такие как кормление, отдых или признаки дистресса. В будущем модель должна быть обучена предсказывать потенциальные проблемы со здоровьем КРС на основе конкретных признаков, загруженных в нейронную сеть, что позволит обнаруживать их на ранней стадии и вовремя принимать меры.

Анализ собранных данных позволит принимать обоснованные управляющие решения относительно стратегий кормления, корректировки окружающей среды или распределения ресурсов, что в конечном итоге может значительно

улучшить производительность и эффективность всего поголовья в молочных хозяйствах.

Для достижения целей исследования необходимо собирать видеоданные из молочных хозяйств с учетом особенностей реализации систем видеонаблюдения в них, фиксируя при этом различные физиологические и поведенческие состояния КРС. Эти данные должны быть подвергнуты методам предварительной обработки для извлечения соответствующих характеристик и аннотаций для обучения нейросетевых моделей. В процессе работы будут исследованы различные архитектуры нейросетей и методики их обучения, чтобы в результате получилась модель, максимально точно классифицирующая КРС. Будут представлены и проанализированы результаты экспериментов с оценкой производительности различных сетевых архитектур и эффективности включения конкретных признаков для прогнозирования физиологического состояния биологических объектов. Полученные результаты позволят определить потенциальные проблемы и направления дальнейших исследований.

1. ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ

Обеспечение качественного распознавания является фундаментальной задачей в компьютерном зрении и системах, обучаемых с помощью нейросетевых технологий. Точное распознавание различных жизненных аспектов КРС, таких как поведение и некие жизненные показатели, необходимо в вопросе обеспечения благосостояния всего поголовья. Существует несколько видов задач распознавания:

Классификация. Данную задачу можно рассмотреть как присвоение метки или категоризации объектам на полноценных изображениях или кадрах видео. В рассматриваемом проекте полезно безошибочно классифицировать не только вид животного (корова или лошадь, рис. 1), но и деятельность животного в рассматриваемый момент времени.

Рис. 1. Классификация объектов на фото с помощью предобученной нейросети: объект «лошадь» (слева), объект «корова» (справа)

Fig. 1. Classification of objects in the photo with a pre-trained neural network: a horse (left), a cow (right)

Локализация. Эта задача включает в себя определение точного местоположения в кадре или получение набора координат объекта. Точная локализация (рис. 2) позволит, к примеру, своевременно определить проблемы с ногами или позвоночником у КРС, ведь у больной коровы походка может сильно отличаться.

Рис. 2. Локализация коровы с помощью предобученной нейросети

Fig. 2. Localization of a cow using a pre-trained neural network

Сегментация – это задача присвоения меток не объекту в целом, а каждому пикселю, который принадлежит объекту. Это существенно повышает точность полученных из видео данных для дальнейшего анализа и принятия решений. Пример сегментации будет приведен далее по ходу работы (см. рассмотрение аннотатора SuperVisely).

Для выполнения поставленных задач на разных этапах понадобится решить все три задачи, так как для автоматического мониторинга состояния крупного рогатого скота недостаточно просто понимать, что в кадре находится КРС, необходимо отличать коров от предметов интерьера, от стен, людей и прочего, что может попасть в кадр. Также необходимо в реальном времени отслеживать жизнедеятельность крупного рогатого скота, что невозможно без детальной и четкой сегментации.

На данный момент существует несколько наиболее известных нейросетевых топологий, которые применяются для решения подобных задач (например, SegNet, DeepLab и другие) [10–12].

В работе [13] представлена модель SegNet, которая является архитектурой глубокого обучения, специально разработанной для семантической сегментации изображений. Модель SegNet состоит из структуры кодер–декодер, где кодер учится извлекать высокоуровневые характеристики из входного изображения, а декодер восстанавливает сегментированное изображение на основе этих характеристик.

Статья [14] описывает современную архитектуру для семантической сегментации изображений. По словам авторов статьи, DeepLab решает такие задачи, как улавливание мелких деталей, обработка больших рецептивных полей и сохранение пространственного разрешения. Авторы используют модифицированную версию популярной архитектуры CNN, такой как VGG-16 или ResNet, для сбора богатой контекстной информации. В дополнение к глубокому CNN и свертке Atrous авторы используют полностью связанные CRF для уточнения результатов сегментации.

В статье [15] представлена архитектура конволюционной нейронной сети (CNN), разработанной специально для задач сегментации биомедицинских изображений. Точная сегментация имеет решающее значение для различных приложений, включая диагностику заболеваний, планирование лечения и медицинские исследования.

Другой моделью, ориентированной на решение задач, связанных с выделением объектов на видеоданных, является YOLOv3 [16]. Проанализируем применимость моделей U-Net и YOLOv3 для решения поставленной задачи. Обе архитектуры легко обучаемы, достаточно легко адаптируются под разные данные и обеспечивают хорошее быстродействие, они используются для задач компьютерного зрения, хотя направленность и области применения у них разнятся.

YOLOv3 – это нейросетевая архитектура, предназначенная для идентификации нескольких объектов на изображении или видео. Данная нейросеть делит входное изображение на сетку и назначает все ячейки данной сетки ответственными за обнаружение объектов. Данный метод позволяет обнаруживать объекты на видео в режиме реального времени.

U-Net, в свою очередь, предназначена для сегментации изображений, где целью является классификация и маркировка каждого пикселя в кадре. Данная архитектура используется в более точных областях, таких как компьютерное определение и сегментация опухолей.

Рис. 3. Сегментация областей в U-Net

Fig. 3. Segmentation of areas in the U-Net

Существенные различия между рассматриваемыми архитектурами.

• *Скорость работы*. YOLOv3 значительно быстрее оппонента в плане скорости, поэтому она является одним из лидеров в задачах обработки в режиме реального времени.

• *Точность работы*. U-Net, хоть и работает ощутимо медленнее, существенно превосходит конкурента в создании высокоточных сегментаций на кадрах.

• *Обучение*. Обе архитектуры требуют аннотированных обучающих данных, но формат этих данных существенно отличается, как и формат выходных данных. YOLOv3 требует аннотации ограничивающих рамок для обучения, тогда как U-Net требует аннотации пикселей.

• *Формат выходных данных*. YOLOv3 выводит координаты рамок вместе с вероятностью класса для всех обнаруженных объектов (объект «лошадь» на рис. 1), в то же время U-Net на выходе выдает сегментированное изображение, где все пиксели классифицируются по-разному.

2. АННОТИРОВАНИЕ ВИДЕОДАННЫХ

Для проработки на реальном видео были использованы предобученные модели с сайта ImageAI [17], однако результат на предобученных моделях не смог успешно определить даже малую часть коров на видео (рис. 4). Это показало, что предобученных моделей недостаточно для полноценного распознавания объектов.

Рис. 4. Попытка определения объектов на видео с предобученной нейронной сетью

Fig. 4. An attempt to identify objects in a video with a pre-trained neural network

В дополнение к выбору нейросетевой архитектуры необходимо использовать инструменты аннотации, такие как SuperVisely (рис. 6) или VGG Image

Annotator – VIA (рис. 7). Эти инструменты представляют собой эффективные и удобные интерфейсы для аннотирования видеоданных.

Для аннотирования с помощью SuperVisely исходное видео было разбито на кадры с помощью утилиты ffmpeg (рис. 5).

```
karzhen@MacBook-Pro-Egor Downloads % /Users/karzhen/Downloads/ffmpeg -i short_vi
deo.mp4 -r 3 frames/$image%03d.png
```

Рис. 5. Разбиение исходного видео на кадры

Fig. 5. Splitting the source video into frames

В SuperVisely можно покадрово разбивать видео на области с объектами, тем самым формируя базу данных для сегментации.

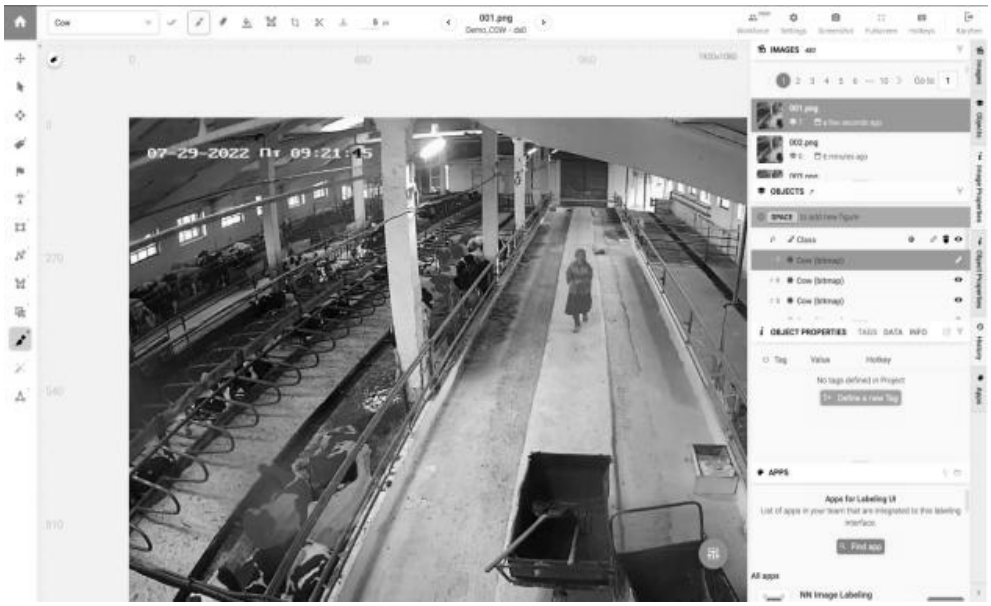


Рис. 6. Выделение зон (сегментов) на кадре в среде SuperVisely

Fig. 6. Selecting zones (segments) on the frame in the SuperVisely environment

При попытке более точной сегментации при масштабировании кадров видно, что области едва различимы даже для человеческого глаза, который не нужно тренировать для распознавания коров на видео (рис. 8). При этом возникает одна из проблем при решении задачи классификации биологических объектов в видео в задачах автоматического мониторинга их состояния: для качественного аннотирования изображений при дальнейшей классификации и сегментации объектов на видео необходимо использовать изображения с высоким разрешением, что, в свою очередь, требует больших вычислительных мощностей и увеличивает время обработки.

С помощью VIA можно довольно быстро выделять объекты в рамки для последующего пополнения датасета.

Рис. 7. Масштабирование видео для более точного сегментного аннотирования

Fig. 7. Scaling video for more accurate segment annotation

Рис. 8. Выделение зон (рамок) в VGG Image Annotator

Fig. 8. Selecting zones (frames) in the VGG Image Annotator

3. ЗАДАЧА ФОРМИРОВАНИЯ ДАТАСЕТА

На этапе формирования датасета необходимо использовать методы предварительной обработки для извлечения релевантных характеристик объектов. Перечислим основные методы.

• Выборка кадров. В некоторых случаях (рис. 11) далеко не все кадры имеют значимость при формировании датасета, так как кадры могут практически не отличаться. Если видео снято в разрешении 60 кадров в секунду, а животное стоит неподвижно, то сотни кадров могут быть не нужны, так как будут идентичными. Выборка кадров помогает сформировать множество кадров, которые будут сохранять временную характеристику, но при этом не будут использоваться дополнительные вычислительные мощности.

• Изменение размера и масштабирование кадров. Данный метод помогает стандартизировать датасет. Для более точного и быстрого обучения изображения должны иметь одинаковый формат.

• Дополнение данных. Данный метод применяется для увеличения разнообразия обучающих данных. Дополнение данных включает в себя переворачивание, отзеркаливание, добавление шумов или избавление от них, высветление или затемнение изображения, изменение цветовой гаммы и прочее (рис. 9–12).

• Вычитание фона. Данный метод полезен в задаче сегментации объектов, где нужно отделить объекты переднего фона от элементов заднего.

Опишем подробнее метод дополнения данных.

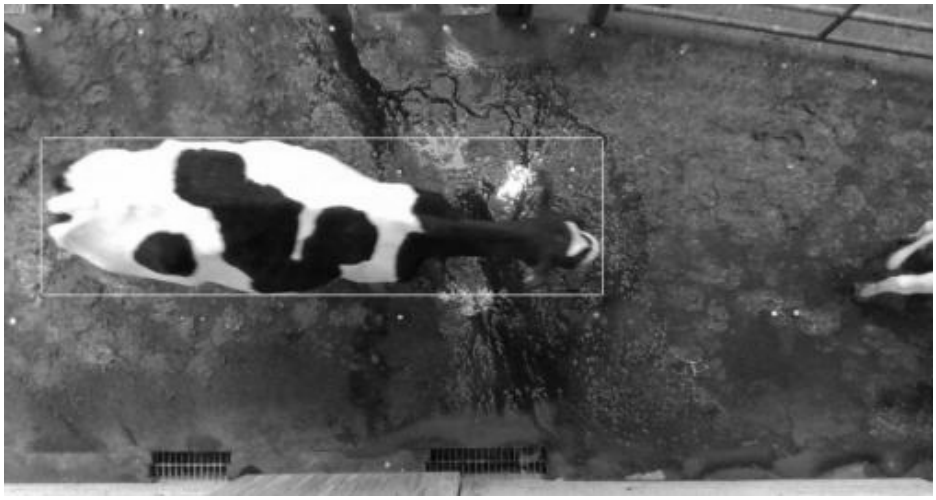


Рис. 9. Аннотирование КРС с помощью VGG Image Annotator

Fig. 9. Annotating cattle with the VGG Image Annotator

С помощью VIA аннотированы объекты «корова» на разных кадрах (рис. 9), затем с помощью скрипта на python для каждого изображения в исходной папке реализован метод дополнения данных (рис. 10), в результате которого для каждого кадра созданы перевернутое, отраженное, осветленное на 20 % и затемненное на 20 % изображения.

```python
import os
import cv2

# Define the paths for the original dataset folder and the new dataset folder
original_folder = 'dataset'
new_folder = 'newDataset'

# Create the new dataset folder if it doesn't exist
if not os.path.exists(new_folder):
    os.makedirs(new_folder)

# Define the data augmentation transformations
transformations = [
    ('original', lambda img: img),
    ('flipped', lambda img: cv2.flip(img, 1)),
    ('mirrored', lambda img: cv2.flip(img, 0)),
    ('brightened', lambda img: cv2.convertScaleAbs(img, alpha=1.2, beta=0)),
    ('darkened', lambda img: cv2.convertScaleAbs(img, alpha=0.8, beta=0))
]

# Loop through the files in the original dataset folder
for filename in os.listdir(original_folder):
    # Load the original image
    image_path = os.path.join(original_folder, filename)
    img = cv2.imread(image_path)

    # Apply data augmentation and save the images to the new dataset folder
    for transform_name, transform_func in transformations:
        transformed_img = transform_func(img)
        new_filename = f'{os.path.splitext(filename)[0]}_{transform_name}.jpg'
        new_image_path = os.path.join(new_folder, new_filename)
        cv2.imwrite(new_image_path, transformed_img)
```

Рис. 10. Скрипт на языке python для дополнения данных

Fig. 10. A python script for data augmentation

Рис. 11. Исходный датасет с объектом «корова» в разных кадрах

Fig. 11. Source dataset with the “cow” object in different frames

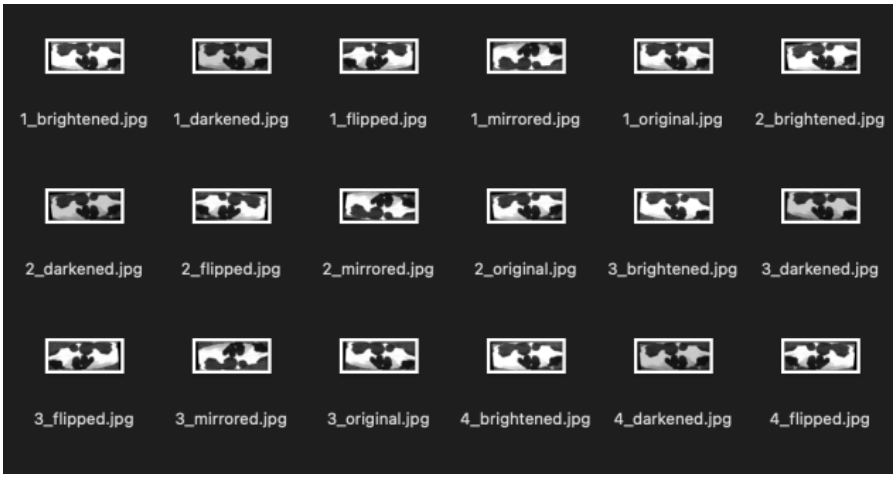


Рис. 12. Датасет после аугментации данных

Fig. 12. Dataset after data augmentation

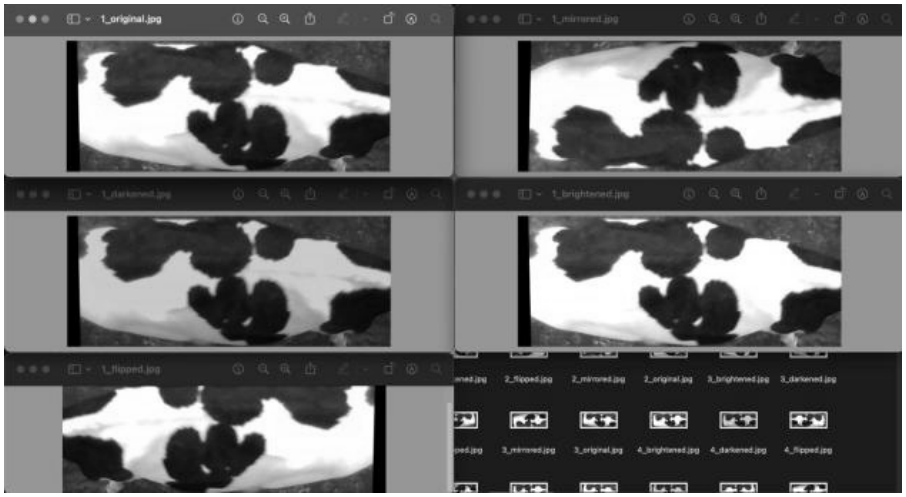


Рис. 13. Вариации одного изображения после применения скрипта

Fig. 13. Variations of a single image after applying the script

Важно отметить, что аугментация данных должна применяться только к обучающему набору данных. Наборы данных для проверки и тестирования не должны подвергаться увеличению данных, а должны содержать строго оригинальные изображения.

Для проверки работоспособности на предобученных моделях YOLOv3 и RetinaNET было взято небольшое видео, где человек четко будет видеть коров на видео. Существенная разница заметна в скорости выполнения программы с помощью разных моделей.

Результат работы YOLOv3 составил 42.914 секунды.

В свою очередь, время выполнения программы с RetinaNET заняло 218.175 секунды.

На рис. 14 и 15 представлены результаты для некоторых кадров из исходного видео.

Рис. 14. Исходное изображение, RetinaNet (51,88 %), YOLOv3 (96,5 %)

Fig. 14. An original image, RetinaNet (51.88 %), YOLOv3 (96.5 %)

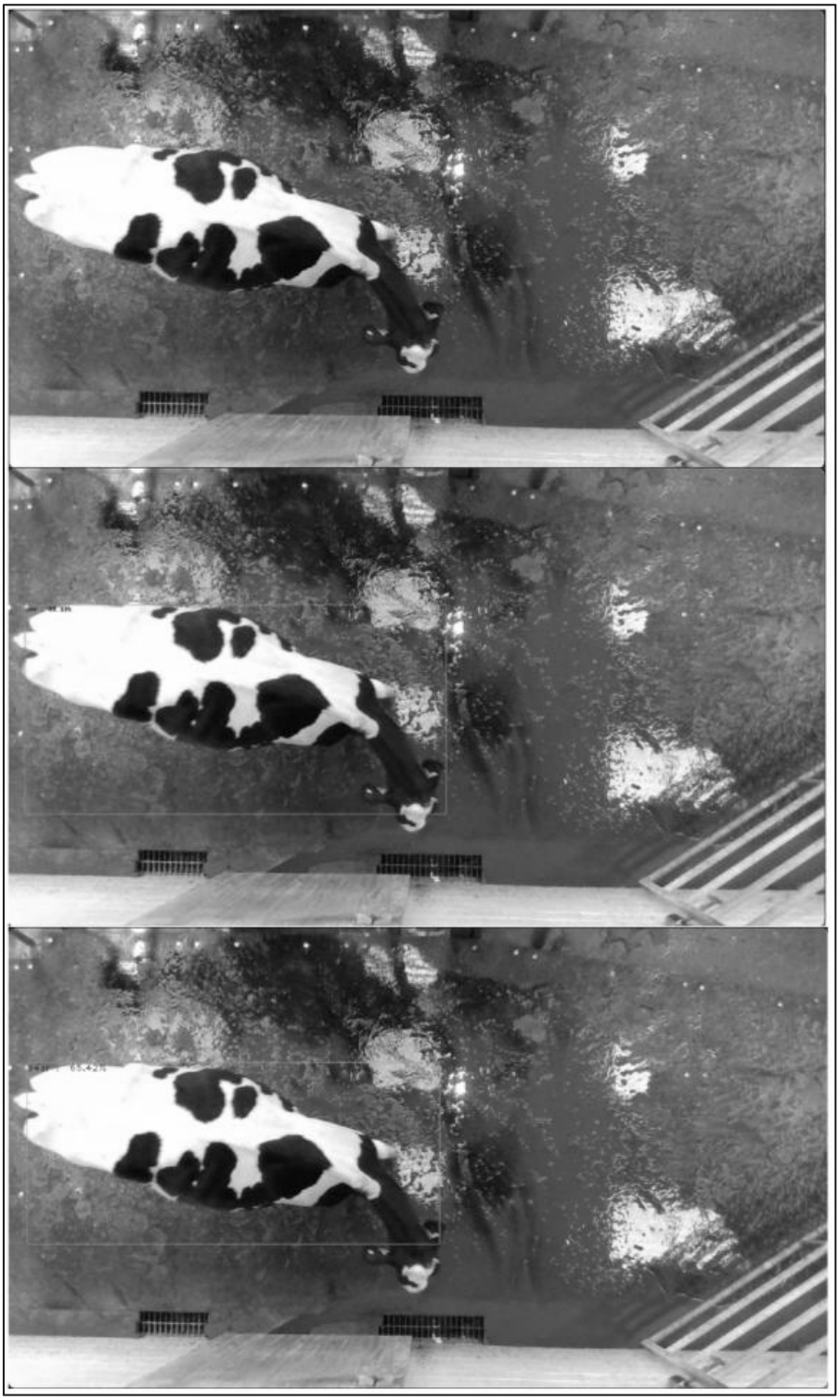


Рис. 15. Исходное изображение, RetinaNet (89,13 %), YOLOv3 (65,42 %)

Fig. 15. An original image, RetinaNet (89.13 %), YOLOv3 (65.42 %)

Сравнение рассмотренных моделей показало только существенную разницу по скорости, точность классификации не оказалась стабильно лучше у одной из моделей, поэтому без дополнительного обучения рано делать выводы и расставлять приоритеты использования.

В таблице приведен сравнительный анализ рассмотренных моделей для видео длительностью 5 секунд.

Сравнительный анализ работы RetinaNet и YOLOv3

Comparative analysis of RetinaNet and YOLOv3 performance

Название модели	Время выполнения	Процент классификации в первом примере	Процент классификации во втором примере
RetinaNet	218.175 с	51.88 %	89.13 %
YOLOv3	42.914 с	96.5 %	65.42 %

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрены задачи распознавания объектов на видео, описаны основные современные нейросетевые технологии, используемые для поставленных задач. Проведен сравнительный анализ наиболее релевантных для решаемой задачи архитектур U-Net и YOLOv3. При использовании каждой архитектуры выделены преимущества и недостатки. U-Net предназначена для высокоточных сегментаций в кадре, а YOLOv3 значительно быстрее по скорости, поэтому она больше подходит для использования в режиме реального времени. Во время работы использовались аннотаторы изображений SuperVisely и VGG Image Annotator. С их помощью был сформирован базовый датасет, который впоследствии значительно увеличился путем аугментации данных. Для проверки сверточных нейросетей в задаче классификации объектов на видео были использованы предобученные модели RetinaNet и YOLOv3.

Сформулированы следующие требования к исходным данным для эффективного решения поставленной задачи выделения и классификации биологических объектов в реальном времени:

- Необходимо использовать камеры как можно более высокого разрешения с учетом стоимости и экономической эффективности для четкого приближения объектов на этапе аннотирования.
- Во избежание появления слепых зон в месте обитания КРС необходимо использовать достаточно большое количество камер, размещенных с перекрытием исследуемого пространства, чтобы объекты мониторинга были постоянно в поле видимости. Это позволит впоследствии составить общую картину высокого разрешения, составленную из изображений всех камер, а по полученной картине осуществлять классификацию объектов посредством ИНС.
- Для достижения необходимой точности классификации с помощью исследованных моделей ИНС RetinaNet и YOLOv3 необходимо либо самостоятельно формировать датасет из реальных данных, либо брать за основу пред-

обученные модели, но дообучать их с помощью аннотированных вручную видеоданных.

Выявленные требования будут учтены при дальнейших исследованиях в рамках решения задачи автоматического мониторинга и прогнозирования состояния биологических объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Селянкин В.В.* Компьютерное зрение. Анализ и обработка изображений. – СПб.: Лань, 2019. – 152 с.

2. Video analytics for dairy farm operations. – URL: https://www.cattle-care.com/ (accessed: 30.08.2023).

3. *Koç E., Türkoğlu M.* Forecasting of medical equipment demand and outbreak spreading based on deep long short-term memory network: the COVID-19 pandemic in Turkey // Signal, Image and Video Processing. – 2022. – Vol. 16 (3). – P. 613–621. – DOI: 10.1007/s11760-020-01847-5.

4. Progress and opportunities to advance clinical cancer therapeutics using tumor dynamic models / R. Bruno, D. Bottino, D.P. de Alwis, A.T. Fojo, J. Guedj, C. Liu, K.R. Swanson, J. Zheng, Y. Zheng, J.Y. Jin // Clinical Cancer Research. – 2020. – Vol. 26 (8). – P. 1787–1795. DOI: 10.1158/1078-0432.CCR-19-0287.

5. Support to early clinical decisions in drug development and personalised medicine with checkpoint inhibitors using dynamic biomarker-overall survival models / R. Bruno, P. Chanu, M. Kågedal, F. Mercier, K. Yoshida, J. Guedj, C. Li, U. Beyer, J.Y. Jin // British Journal of Cancer. – 2023. – P. 1–6. – DOI: 10.1038/s41416-023-02190-5.

6. Применение искусственного интеллекта при оптимизации орошения и применении гербицидов / А.Ю. Федосов, А.М. Меньших, В.А. Фартуков, М.И. Зборовская, Д.М.Васильев // Экономика строительства. – 2023. – № 2. – С. 42–51.

7. *Федосов А.Ю., Меньших А.М.* Внедрение искусственного интеллекта в растениеводство для оптимизации орошения // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2022. – Т. 16, № 4. – С. 45–53.

8. *Сурай Н.М., Кудинова М.Г.* Внедрение цифровых технологий в молочном животноводстве // Парадигма устойчивого развития агропромышленного комплекса в условиях современных реалий: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию создания ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ. – Красноярск, 2022. – С. 180–186.

9. *Мохов А.Ю., Абезин Д.А.* Правовые аспекты использования технологий искусственного интеллекта в целях обеспечения продовольственной безопасности страны // Аграрное и земельное право. – 2022. – № 12 (216). – С. 97–100.

10. Deep residual learning for image recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – Las Vegas, NV, USA, 2016. – P. 770–778. – DOIP: 10.1109/CVPR.2016.90.

11. DeepHeart: semi-supervised sequence learning for cardiovascular risk prediction / B. Ballinger, J. Hsieh, A. Singh, N. Sohoni, J. Wang, G. Tison, G. Marcus, J. Sanchez, C. Maguire, J. Olgin, M. Pletcher // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2018. – Vol. 32 (1). – DOI: 10.1609/aaai.v32i1.11891.

12. *Лукашевич М.М.* Цифровая обработка изображений и распознавание образов. – Минск: БГУИР, 2023. – 72 с.

13. *Badrinarayanan V., Kendall A., Cipolla R.* SegNet: a deep convolutional encoder-decoder architecture for robust semantic pixel-wise labelling. – 2015. – arXiv:1511.00561. – DOI: 10.48550/arXiv.1511.00561.

14. DeepLab: semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs / L.C. Chen, G. Papandreou, I. Kokkinos, K. Murphy, A.L. Yuille // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2018. – Vol. 40 (4). – P. 834–848. – DOI: 10.1109/tpami.2017.2699184. – PMID: 28463186.

15. *Ronneberger O., Fischer P., Brox T.* U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. – Cham: Springer, 2015. – P. 234–241. – (Lecture Notes in Computer Science; vol. 9351). – DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.

16. *Redmon J., Farhadi A.* YOLOv3: An incremental improvement: report. – University of Washington, 2018. – URL: https://tethys.pnnl.gov/publications/yolov3-incremental-improvement (accessed: 30.08.2023).

17. *Olafenwa M.* ImageAI: Object Detection. – URL: https://github.com/OlafenwaMoses/ImageAI/tree/master/imageai/Detection (accessed: 30.08.2023).

Черкашин Егор Александрович, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории автоматизации научных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук». Основное направление научных исследований – методы нейросетевого управления и прогнозирования биологических объектов, методы компьютерного зрения. Имеет 3 печатные работы. E-mail: egor@cea7.ru

Cherkashin Egor A., a PhD student, junior researcher at the laboratory of research automation in the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. The main field of his scientific research is methods of neural network control and prediction of biological objects, methods of computer vision. He has 3 publications. E-mail: egor@cea7.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-69-86

Application of neural networks for the classification of objects in video data in the tasks of automatic monitoring of the condition of biological objects[*]

E.A. CHERKASHIN

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 39 V.O., 14th line, 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

egor@cea7.ru

Abstract

A steady trend towards the development of technologies in everyday life and industry leads to their constant complication, to the introduction of new developments and methods, new ways of acquiring and processing information. Video surveillance systems have become an integral part of everyday life. Cameras are installed in apartment buildings, public places, even in apartments and private houses. However, one of the most important areas where computer vision has found significant application is the observation of biological objects and analysis of their behavior and state, especially in the context of nature protection and automation of animal behavior research. With the growth of quality and quantity of video materials, the problem of accurate and efficient methods for classifying objects in real time becomes relevant, especially when it comes to automatic monitoring of animal condition. There can be no mistakes here, so it is necessary to use only the latest technology. This paper describes the main types of object recognition, considers popular modern neural network architectures, and performs a comparative analysis of some of them in relation to the problem to be solved. In the course of work using methods of additional processing and image annotators SuperVisely and VGG Image Annotator, a dataset with more than a thousand unique images for extraction of relevant characteristics of objects was formed, and experimental studies of the quality of object recognition on video using pre-trained known neural network models were carried out. The requirements to the initial data for effective solution of the problem of automatic monitoring and prediction of the condition of biological objects have

[*] *Received 15 June 2023.*

The research is supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 23-19-20081, https://rscf.ru/en/project/23-19-20081/, and St. Petersburg Science Foundation.

been defined and formulated. It is shown that in order to avoid the appearance of blind zones in the animal habitat it is necessary to use a sufficiently large number of cameras placed with overlapping of the investigated space so that the monitoring objects were constantly in the field of visibility. This will subsequently make it possible to compile an overall high-resolution picture made up of images from all cameras and on the basis of the obtained picture to classify objects using artificial neural networks.

Keywords: artificial neural networks, computer vision, neural network prediction, image dataset, data augmentation, image classification, object localization, area segmentation, video data annotation

REFERENCES

1. Selyankin V.V. *Komp'yuternoe zrenie. Analiz i obrabotka izobrazhenii* [Computer vision. Analysis and processing of images]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2019. 152 p.

2. *Video analytics for dairy farm operations*. Available at: https://www.cattle-care.com/ (accessed 30.08.2023).

3. Koç E., Türkoğlu M. Forecasting of medical equipment demand and outbreak spreading based on deep long short-term memory network: the COVID-19 pandemic in Turkey. *Signal, Image and Video Processing*, 2022, vol. 16 (3), pp. 613–621. DOI: 10.1007/s11760-020-01847-5.

4. Bruno R., Bottino D., Alwis D.P. de, Fojo A.T., Guedj J., Liu C., Swanson K.R., Zheng J., Zheng Y., Jin J.Y. Progress and opportunities to advance clinical cancer therapeutics using tumor dynamic models. *Clinical Cancer Research*, 2020, vol. 26 (8), pp. 1787–1795. DOI: 10.1158/1078-0432.CCR-19-0287.

5. Bruno R., Chanu P., Kågedal M., Mercier F., Yoshida K., Guedj J., Li C., Beyer U., Jin J.Y. Support to early clinical decisions in drug development and personalized medicine with checkpoint inhibitors using dynamic biomarker-overall survival models. *British Journal of Cancer*, 2023, pp. 1–6. DOI: 10.1038/s41416-023-02190-5.

6. Fedosov A.Y., Menshikh A.M., Fartukov V.A., Zborovskaya M.I., Vasiliev D.M. Primenenie iskusstvennogo intellekta pri optimizatsii orosheniya i primenenii gerbitsidov [The use of artificial ingtellect in the optimization of irrigation and the use of herbicides]. *Ekonomika stroitel'stva = Economics of Construction*, 2023, vol. 2, pp. 42–51.

7. Fedosov A.Yu., Menshikh A.M. Vnedrenie iskusstvennogo intellekta v rastenievodstvo dlya optimizatsii orosheniya [Implementation of artificial intelligence in agriculture to optimize irrigation]. *Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machines and Technologies*, 2022, vol. 16, no. 4, pp. 45–53.

8. Surai N.M., Kudinova M.G. [Introduction of digital technologies in dairy farming]. Materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 70th anniversary *Paradigma ustoichivogo razvitiya agropromyshlennogo kompleksa v usloviyakh sovremennykh realii* [Paradigm of sustainable development of agroindustrial complex in the conditions of modern realities]. Materials of the International Scientific and Practical Conference, Krasnoyarsk, 2022, pp. 180–186. (In Russian).

9. Mokhov A.Yu., Abezin D.A. Pravovye aspekty ispol'zovaniya tekhnologii iskusstvennogo intellekta v tselyakh obespecheniya prodovol'stvennoi bezopasnosti strany [Legal aspects of the use of artificial intelligence technologies to ensure the food security of the country]. *Agrarnoe i zemel'noe pravo = Agrarian and Land Law*, 2022, no. 12 (216), pp. 97–100. DOI: 10.47643/1815-1329_2022_12_97.

10. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 770–778. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90.

11. Ballinger B., Hsieh J., Singh A., Sohoni N., Wang J., Tison G., Marcus G., Sanchez J., Maguire C., Olgin J., Pletcher M. DeepHeart: semi-supervised sequence learning for cardiovascular risk prediction. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2018, vol. 32 (1). DOI: 10.1609/aaai.v32i1.11891.

12. Lukashevich M.M. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii i raspoznavanie obrazov* [Digital image processing and pattern recognition: manual]. Minsk, BGUIR Publ., 2023. 72 p.

13. Badrinarayanan V., Kendall A., Cipolla R. *SegNet: a deep convolutional encoder-decoder architecture for robust semantic pixel-wise labelling*. 2015, arXiv:1511.00561. DOI: 10.48550/arXiv.1511.00561.

14. Chen L.C., Papandreou G., Kokkinos I., Murphy K., Yuille A.L. DeepLab: semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2018, vol. 40 (4), pp. 834–848. DOI: 10.1109/tpami.2017.2699184. PMID: 28463186.

15. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*. Cham, Springer, 2015, pp. 234–241. DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.

16. Redmon J., Farhadi A. *YOLOv3: An incremental improvement*. Report. University of Washington, 2018. Available at: https://tethys.pnnl.gov/publications/yolov3-incremental-improvement (accessed 30.08.2023).

17. Olafenwa M. *ImageAI: Object Detection*. Available at: https://github.com/OlafenwaMoses/ImageAI/tree/master/imageai/Detection (accessed 30.08.2023).

Для цитирования:

Черкашин Е.А. Применение нейронных сетей для классификации объектов в видеоданных в задачах автоматического мониторинга состояния биологических объектов // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 3 (91). – С. 69–86. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-69-86.

For citation:

Cherkashin E.A. Primenenie neironnykh setei dlya klassifikatsii ob"ektov v videodannykh v zadachakh avtomaticheskogo monitoringa sostoyaniya biologicheskikh ob"ektov [Application of neural networks for the classification of objects in video data in the tasks of automatic monitoring of the condition of biological objects]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 3 (91), pp. 69–86. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-69-86.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 91, № 3, 2023, с. 87–104

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 91, No. 3, 2023, pp. 87–104

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ
И ИНФОРМАТИКА

COMPUTER SCIENCE
AND INFORMATION SCIENCE

УДК 004.9: 621.1 (045)

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-87-104

Проектирование индукционного устройства для нагрева жидкой среды*

В.В. ЛЬГОТЧИКОВ[a], Т.С. ЛАРЬКИНА[b]

214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет “МЭИ”»

[a] *vvldrive@yandex.ru* [b] *tatyana.larkina.2015@yandex.ru*

Проектирование индукционных устройств для нагрева жидкой среды является актуальной задачей в современной промышленности. Индукционный нагрев является эффективным и экономичным способом обеспечения равномерного и быстрого нагрева жидкости без необходимости прямого контакта с нагревательным элементом. Он находит широкое применение в различных отраслях промышленности, таких как металлургия, нефтегазовая промышленность, пищевая промышленность, в медицине и научных исследованиях. Проектирование индукционных устройств для нагрева жидкой среды требует учета множества факторов, таких как свойства жидкости, параметры индукционной катушки, тип источника питания и другие. Одним из главных преимуществ индукционного нагрева является возможность точного контроля нагрева и его эффективности, что позволяет уменьшить затраты на энергию и повысить производительность производственных процессов. В связи с этим проектирование индукционных устройств для нагрева жидкой среды имеет большое значение в современной промышленности и науке, позволяя повысить производительность и качество производственных процессов, а также уменьшить затраты на энергию и повысить безопасность производства.

В настоящей статье предложена общая структура программно-аппаратного обеспечения индукционного устройства для нагрева жидкой среды; предложена математическая модель, предназначенная для расчетов тепловых и электромагнитных процессов в рассматриваемой индукционной установке; выполнен эксперимент с выбором интересующих факторов, формулировкой целевых функций с использованием теории планирования эксперимента для получения регрессионных соотношений синтеза индуктора, состава оптимизационных процедур, реализуемых программным обеспечением микроконтроллера, и обоснования необходимости идентификационных процедур.

В ходе работы подверглись анализу математические модели в программном комплексе Maple.

Ключевые слова: индукционный нагрев, индукционное устройство, идентификация, нагрев жидкости, система управления, регулирование, теория планирования эксперимента, регрессия

---

* *Статья получена 17 мая 2023 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование индукционных устройств для нагрева жидкой среды является важной задачей во многих промышленных отраслях. Индукционный нагрев является эффективным и безопасным методом нагрева, который позволяет быстро и равномерно нагреть жидкую среду без необходимости использования прямого контакта с нагревательным элементом. Применение индукционного нагрева позволяет значительно снизить затраты на энергию и повысить производительность производственных процессов. Однако проектирование индукционных устройств требует тщательной оценки характеристик жидкости, выбора подходящей обмотки индукционной катушки и наличия источника питания, а также тестирования и настройки устройства для обеспечения максимальной эффективности и безопасности. Проектирование индукционных устройств для нагрева жидкой среды имеет широкий спектр применения в различных отраслях промышленности, в науке и медицине. Кроме того, это является важным направлением в развитии новых технологий, направленных на улучшение качества и производительности производственных процессов.

Целью данного исследования является предложение общей структуры программно-аппаратного обеспечения индукционного устройства для нагрева жидкой среды; предложение математической модели, требуемой для расчетов тепловых и электромагнитных процессов в принятом комплексе; проведение эксперимента с выбором интересующих факторов, формулировкой целевых функций с использованием теории планирования эксперимента для получения регрессионных соотношений синтеза индуктора, состава оптимизационных процедур, реализуемых программным обеспечением микроконтроллера, и обоснования необходимости идентификационных процедур.

В данном контексте основная цель проектирования индукционного устройства для нагрева жидкой среды заключается в обеспечении оптимальных условий нагрева, учитывая требования конкретного производства. Для этого необходимо провести анализ свойств жидкости, выбрать соответствующую индукционную катушку и источник питания, а также оптимизировать работу устройства для достижения максимальной эффективности и безопасности. Таким образом, проектирование индукционных устройств для нагрева жидкой среды имеет большое значение в современной промышленности и науке, позволяя повысить производительность и качество производственных процессов, а также уменьшить затраты на энергию и повысить безопасность производства.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ИНДУКЦИОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАГРЕВА ЖИДКОЙ СРЕДЫ

Общая структура программно-аппаратного обеспечения индукционного устройства для нагрева жидкой среды представлена на рис.1. Структура задает и программу работы над проектированием эффективного нагревателя [1, 2]. Из блоков программного обеспечения с номерами 1–4 каждый самодостаточен и важен для качественного решения технологической задачи.

Результатом разработки первого блока явилась математическая модель процесса, на базе которой проведен синтез системы автоматического регулирования (САР), осуществлен выбор корректирующего устройства.

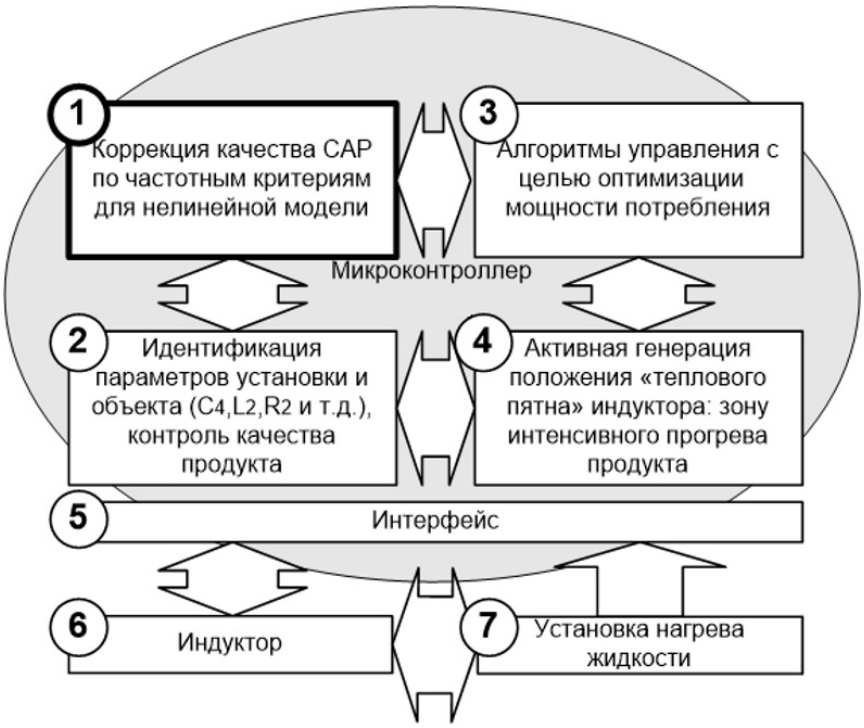


Рис. 1. Структура программно-аппаратного обеспечения индукционного устройства для нагрева жидкой среды

Fig. 1. The structure of the software and hardware of an induction device for heating a liquid medium

В основу математической модели процесса положена система пяти дифференциальных уравнений (1). Модель соответствуют нагревателю средней мощности [3–6]:

$$\begin{cases} u_1(p) = i_1(p)\left\{R_1\left[1+\alpha(\tau_1(p)+t_4-20)\right]+L_1 p\right\} - i_2(p)M_{12}p; \\ 0 = -i_1(p)M_{12}p + i_2(p)\left\{R_2\left[1+\alpha(\tau_2(p)+t_4-20)\right]+L_2 p\right\}; \\ i_1^2(p)R_1\left[1+\alpha(\tau_1(p)+t_4-20)\right] = A_{12}(\tau_1(p)-\tau_2(p)) + \\ \quad + \tau_1(p)C_1 p + A_{14}\tau_1(p); \\ i_2^2(p)R_2\left[1+\alpha(\tau_2(p)+t_4-20)\right] = A_{12}(\tau_2(p)-\tau_1(p)) + \\ \quad + A_{23}(\tau_2(p)-\tau_3(p)) + \tau_2(p)C_2 p + A_{24}\tau_2(p); \\ A_{23}(\tau_2(p)-\tau_3(p)) = \tau_3(p)C_3 p + A_{34}\tau_3(p). \end{cases} \quad (1)$$

Тепловой процесс характеризуют абсолютная температура, превышения температуры, теплоемкости отдельных элементов схемы, коэффициенты теплопередачи (t, τ_j, C_j, A_{jk} при j = 1, 2, 3; k = 2, 3, 4).

Индексы у параметров соответствуют индуктору (1), вторичному телу (2), нагреваемому токами Фуко в однослойной модели [4], объему нагреваемой жидкости (3), окружающей среде (4) (рис. 2, *а*).

Численные значения параметров тепловой модели: $C_1 = 500$ Вт · с/°С; $C_2 = 1000$ Вт · с/°С; $C_3 = 21\,000$ Вт · с/°С; $A_{12} = 200$ Вт/°С; $A_{14} = 20$ Вт/°С; $A_{23} = 200$ Вт/°С; $A_{24} = 20$ Вт/°С; $A_{34} = 20$ Вт/°С.

Блок-схема процесса энергообмена нагревателя жидкости и структурная схема замкнутой системы регулирования температуры жидкой среды представлены на рис. 2, *а*, *б*.

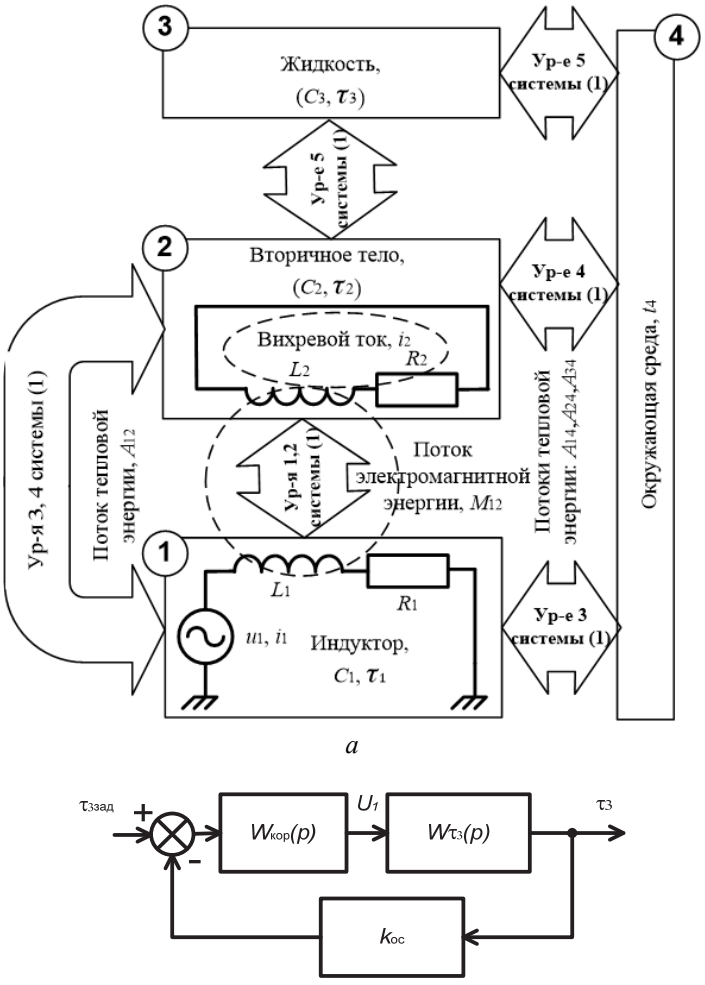


Рис. 2. Блок-схема процесса энергообмена нагревателя жидкости (*а*); структурная схема замкнутой системы регулирования температуры жидкой среды (*б*)

Fig. 2. Block diagram of the energy exchange process of the liquid heater (*a*); block diagram of a closed system for controlling the temperature of a liquid medium (*б*)

Передаточная функция корректирующего устройства, выбранного из условия обеспечения приемлемой погрешности отслеживания программного задания изменения температуры жидкой среды по технологической карте, принимает следующий вид:

$$W_{\text{кор}}(p) = \frac{(1+T_{k1}p)(1+T_{k2}p)}{(1+T_{k3}p)^2}.$$

Численные значения параметров САР: $k_{\text{ос}}$ = 0,0154; T_{k1} = 273 с; T_{k2} = = 13,3 с; T_{k3} = 56,2 с. Введены обозначения для питающего напряжения, токов (u_1, i_i при i = 1, 2), активных и индуктивных сопротивлений, коэффициента взаимной индукции (R_i, L_i, M_{12}). Численные значения параметров электромагнитной части модели: R_1 = 0,3 Ом; R_2 = 1 Ом; $L_1 = 40\cdot10^{-5}$ Гн; L_2 = $= 40\cdot10^{-4}$ Гн; $M_{12} = 40\cdot10^{-5}$ Гн.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РЕГРЕССИОННЫХ СООТНОШЕНИЙ

Для определения общей стратегии синтеза индуктора (рис. 1, блок 6), состава оптимизационных процедур, реализуемых программным обеспечением микроконтроллера (рис. 1, блок 3), и обоснования необходимости идентификационных процедур (рис. 1, блок 2) поставим эксперимент с выбором интересующих нас факторов, формулировкой целевых функций и использованием теории планирования эксперимента для получения регрессионных соотношений [7–9]. Представим иллюстрацию работы математической модели в виде переходных процессов программного нагрева жидкой среды при управляющем воздействии определенной частоты согласно технологической карте ($\omega_{ref} = 1{,}78\cdot10^{-2}$ 1/с) с амплитудой ($A_{ref} = 44$ °С) для сигнала задания по превышению температуры ($\tau_{3ref} = 60 + A_{ref}\sin(\omega_{ref}t)$) (рис. 3). Частота сети 50 Гц.

Расчет проводится в среде Maple [10] при достаточно широком разбросе величин постоянных времени математического описания процесса нагрева. Большие постоянные времени свойственны тепловой части модели, а достаточно малые – электротехнической части. Это ведет к увеличению времени расчета, и длительность технологического интервала выбрана значительной (T_T = 2000 с) с целью достижения квазиустановившегося режима изменения превышения температуры жидкости τ_3.

Синтез и поиск структуры корректирующего звена выполнен «в малом» [11–13], моделирование позволяет убедиться в правильности результата при анализе поведения системы «в большом».

Сигнал рассогласования САР (рис. 3, *г*) перерабатывается корректирующим звеном в амплитуду питающего напряжения с инверсией фазы (рис. 3, *г*). По принципу действия устройства ему не присущ охлаждающий эффект,

поэтому в форме кривых превышения температуры наблюдаются нарушения синусоидальности (рис. 3, *а–в*). Вид графика изменения мгновенного значения тока на сетевой частоте объясняется выбором временного интервала снятия переходного процесса (рис. 3, *е*), соответствующего моменту смены знака амплитуды питающего напряжения (рис. 3, *д*).

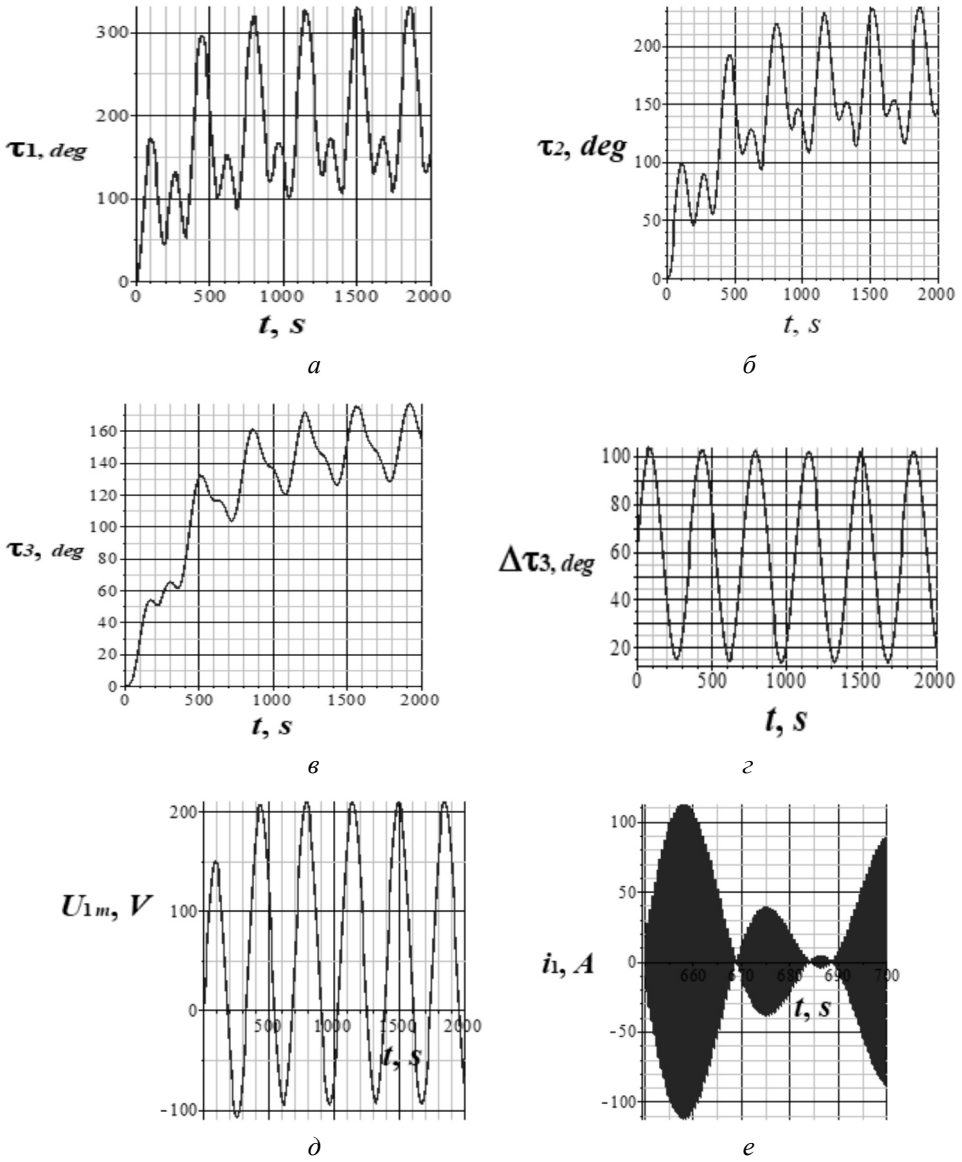


Рис. 3. Процессы изменения превышения температур индуктора τ_1 (*а*), вторичного тела τ_2 (*б*) и жидкости τ_3 (*в*); переходный процесс изменения сигнала рассогласования САР $\Delta\tau_3$ (*г*), амплитудного значения питающего напряжения U_{1m} (*д*) и мгновенного значения тока индуктора i_1 (*е*)

Fig. 3. Processes of changing the temperature rise of the inductor τ_1 (*a*) of the secondary body τ_2 (*б*) and the liquid τ_3 (*в*); a transient change in the ACS mismatch signal $\Delta\tau_3$ (*г*), the amplitude value of the supply voltage U_{1m} (*д*) and the instantneous value of the inductor current i_1 (*е*)

Получим из модели информацию, необходимую для проектирования и управления нагревателем. Для анализа влияния на поведение САР отдельных параметров поставим эксперимент с определением регрессионных соотношений. Ограничимся четырьмя факторами $(x_1 - x_4)$, связанными с параметрами системы: частотой питающей индуктор сети $(\omega_1 = x_1)$; активными сопротивлениями индуктора и контура токов Фуко $(R_1 / R_2 = x_2)$; индуктивными сопротивлениями индуктора и контура токов Фуко $(L_1 / L_2 = x_3)$; коэффициентом взаимной индукции $\left(M_{12}^2 / (L_1 L_2) = x_4\right)$.

Чтобы выполнить требование независимости факторов [8], введем дополнительные аналитические связи между численными значениями параметров: $R_1 R_2 = 0{,}3$ [Ом^2]; $L_1 L_2 = 0{,}16 \cdot 10^{-5}$ [Гн^2]. Кроме того, принимаем правило изменения параметров при изменении факторов x_1 и x_2: на сколько увеличивается числитель, на столько же уменьшается знаменатель, и наоборот. Размах изменения параметров не превосходит 50 % от их первоначального значения. Дополнительные правила формирования поля значений изменяющихся параметров введены для того, чтобы меньшим числом факторов, а значит, и меньшим числом экспериментов охватить большее количество параметров: четыре фактора при шести параметрах. Значения кодированных факторов (X_i при i = 1 – 4) связаны с факторами (x_i при i = 1 – 4) формулой $X_i = (x_i - x_{imid}) / (x_{imid} - x_{i\min})$, где x_{imid} – среднее значение фактора; $x_{i\min}$ – минимальное значение фактора. Выбираем ортогональный центральный композиционный план (ОЦКП) проведения эксперимента и получения регрессионных зависимостей. Общее число опытов для четырех факторов (n = 4) равно $N = 2^n + 2n + 1 = 25$. К плану полного факторного эксперимента (ПФЭ) добавлено по два опыта на фактор в звездных точках и один опыт в центре плана. Координаты звездных точек: $X_i = \pm 1{,}414$ [3].

В табл. 1 представлены уровни факторов, их кодированные значения и соответствие между этими величинами, представленное графически.

Целевыми выбраны три функции, отражающие энергетическую эффективность устройства и его управляемость. Цикловой КПД по входной мощности (η_A) рассчитывается за технологический период работы нагревателя (T_T = 2000 с) как отношение усредненных мощностей активной (P_A) к полной (S), потребляемых из сети:

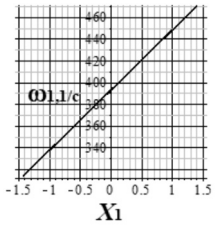
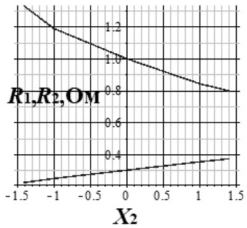
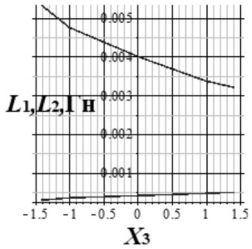
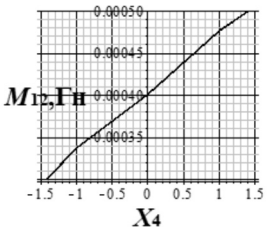
$$\eta_A = \frac{P_A}{S} = \frac{\int_0^{T_T} \left(U_{1m}(t)\sin(\omega_1 t) i_1(t)\right) dt}{\sqrt{\int_0^{T_T} i_1^2(t) dt \int_0^{T_T} \left(U_{1m}(t)\sin(\omega_1 t)\right) dt}}. \qquad (2)$$

Таблица 1

Table 1

Таблица кодировки факторов ортогонального центрального композиционного плана

Table of coding factors of the orthogonal central composition plan

X_i	–1,414	–1	0	+1	+1,414	$x_i = f(X_i)$
ω_1,1/с	314	337	392,5	448	471	
R_1, Ом	0,225	0,252	0,3	0,357	0,375	
R_2, Ом	1,333	1,188	1,0	0,84	0,80	
L_1, мГн	0,3	0,336	0,4	0,476	0,50	
L_2, мГн	5,33	4,75	4,0	3,36	3,20	
M_{12}, мГн	0,3	0,336	0,4	0,476	0,50	

Второй целевой функцией назначим цикловой технологический КПД ($\eta_{\tau 3}$), который рассчитывается за технологический период работы нагревателя как отношение усредненной мощности, затраченной на нагрев жидкой среды ($P_{\tau 3}$), к активной составляющей мощности, потребленной из сети (P_A):

$$\eta_{\tau_3} = \frac{P_{\tau_3}}{P_A} = \frac{C_3}{T_T} \frac{\int_0^{T_T} \tau_3(t)dt}{\int_0^{T_T} \left(U_{1m}(t)\sin(\omega_1 t) i_1(t)\right)dt}. \quad (3)$$

В качестве третьей целевой функции и меры управляемости САР предлагается использовать коэффициент (K_{con}), равный отношению гармоники изменения превышения температуры жидкой среды к амплитуде гармоники в канале задания САР на частоте ω_{ref} этого же превышения температуры. Расчет производится в квазиустановившемся режиме в конце технологического периода, когда свободные составляющие процесса незначительно сказываются на форме $\tau_3(t)$. При полной управляемости коэффициент K_{con} стремится к единице.

Временной интервал расчета принимается равным $T_{con} = (T_T - 2\pi / \omega_{ref}) - T_T$, и тогда

$$K_{con} = \frac{2}{T_{con}} \frac{\sqrt{A_{\sin}{}^2 + A_{\cos}{}^2}}{A_{ref}}, \tag{4}$$

где $\begin{cases} A_{\sin} = \int\limits_{T_{con}} \tau_3(t)\sin(\omega_{ref} t)dt, \\ A_{\cos} = \int\limits_{T_{con}} \tau_3(t)\cos(\omega_{ref} t)dt \end{cases}$ – составляющие первой гармоники регулируемой величины – превышения температуры жидкой среды τ_3.

Результаты экспериментов обрабатывались авторской программой, созданной в среде Excel [14].

В базе есть возможность проводить регрессионный анализ результатов: контролировать адекватность модели по *F*-критерию (распределение Фишера), исключать незначимые коэффициенты с использованием критерия Стьюдента, оценивать точность регрессии. Фрагмент рабочего окна Excel (пиктограмма) обработки одной из баз данных представлен на рис. 4 в качестве примера.

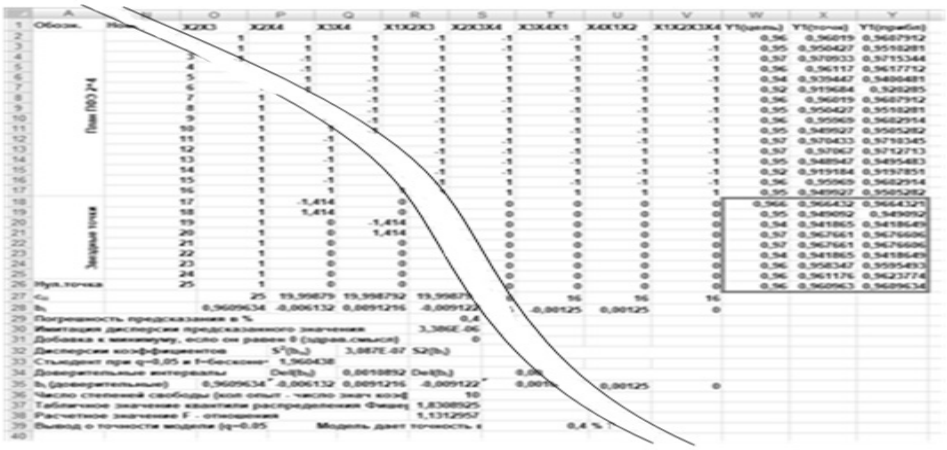


Рис. 4. Фрагмент рабочего окна базы данных ортогонального центрального композиционного плана для четырех факторов

Fig. 4. Fragment of the working window of the orthogonal central compositional plan database for four factors

Значимые коэффициенты регрессий или аппроксимирующих полиномов для двух целевых функций представлены в табл. 2. Для предложенных интервалов изменения факторов $\eta_{\tau 3} \equiv 0{,}12$.

Коэффициенты из табл. 2 позволяют сформировать модели (суммы членов) из нулевого члена, членов вида $b_i X_i$ (линейная регрессия), членов вида $b_{ijk} X_i X_j X_k$ и $b_{1234} X_1 X_2 X_3 X_4$, отражающих взаимодействие факторов и членов вида $b_{ii} X_i^2$ (квадратичной регрессии). Отсутствующие в таблице коэффициенты равны нулю: они незначимы, выходят за пределы доверительных интервалов.

По знаку, величине коэффициентов регрессионного полинома можно судить о силе влияния на целевую функцию того или иного фактора. На целевую функцию η_A, которая характеризует эффективность использования сетевой мощности с высоким косинусом (2), существенное влияние оказывает первый фактор (частота питающей сети) через коэффициент линейной регрессии.

Таблица 2

Table 2

Коэффициенты регрессий для первого эксперимента

Regression coefficients for the first experiment

Коэффициенты регрессии для (η_A)							
b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{11}	b_{22}	b_{33}
0,961	–0,0061	0,0091	–0,0091	0,001	–0,0016	–0,0031	–0,0031

b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}	b_{234}	b_{341}	b_{412}
0,0025	–0,0025	0,0025	0,00125	–0,0013	–0,00125	0,00125

Коэффициенты регрессии для (K_{con})							
b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{23}
0,482	–0,0011	–0,047	–0,0022	–0,0041	0,004	–0,0035	0,0019

С ростом частоты эффективность устройства падает. Коэффициенты линейной регрессии для второго и третьего факторов больше в полтора раза. Составляющая квадратичной регрессии для первого фактора невелика, но по ее знаку можно судить о том, что поверхность регрессионной зависимости будет выпуклой (вторая производная меньше нуля). Наиболее сильно первый фактор взаимодействует со вторым и третьим факторами, причем взаимодействие по знаку разнонаправленное: если при увеличении частоты и одновременном увеличении R_1 и уменьшении R_2 КПД η_A растет, то в ситуации роста частоты, увеличения L_1 и уменьшения L_2 КПД η_A падает. Отмеченное влияние факторов можно прокомментировать так: с ростом частоты идет более энергичный энергообмен сети и потребителя реактивной мощностью, и рост активного сопротивления в первичной цепи индуктора обеспечивает энергообмен с повышением косинуса, а рост индуктивности увеличивает долю реактивной мощности с понижением косинуса. Коэффициенты регрессии при парных взаимодействиях указывают на усиление тенденции, отмеченной для линейной части

регрессии при допущенном соотношении активно-индуктивных сопротивлений первичной и вторичной цепей. Такого рода интерпретация результата может быть полезна для подтверждения непротиворечивости результатов основным представлениям экспериментатора о процессах энергообмена. Первичный анализ наряду с отдельными слагаемыми регрессии и более сложных корреляций факторов, высоких порядков взаимодействий может быть дополнен влиянием начальных уровней факторов на результат эксперимента и т. п.

Приведем несколько поверхностей отклика (несколько «сечений» регрессии), сводя модель к двухфакторному эксперименту, при фиксированном уровне двух других факторов (рис. 5). Иллюстрируются уже отмеченные закономерности изменения целевых функций. Показан фрагмент поверхности отклика с выраженным максимумом (рис. 5, *б*), однако эффект незначителен и находится на уровне показателей точности регрессионной модели (0,4 %).

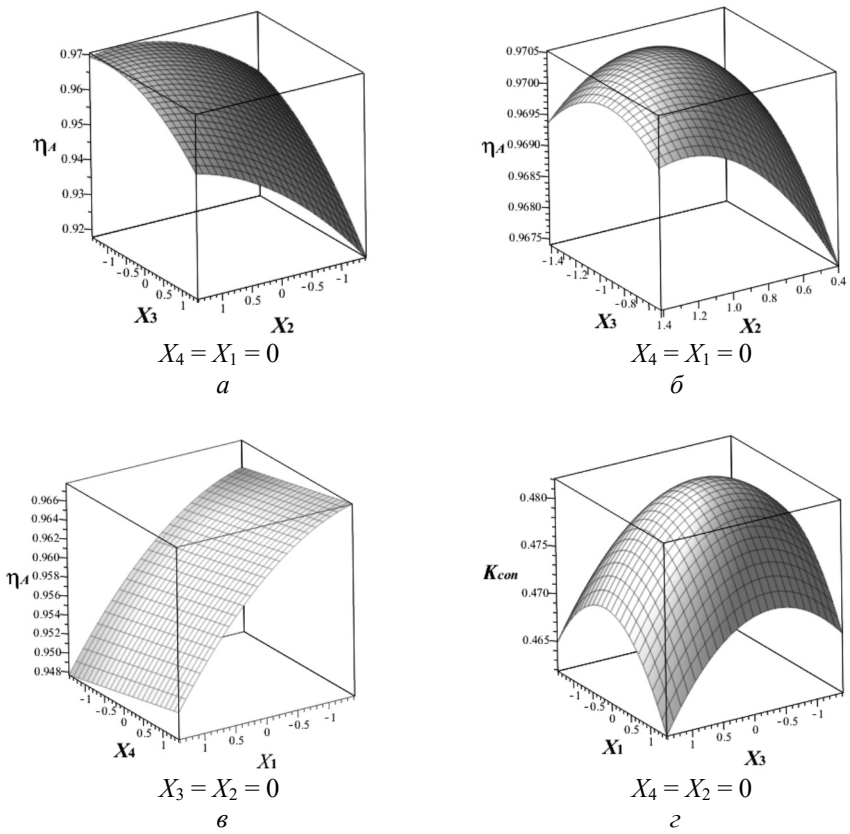


Рис. 5. Поверхности отклика η_A (*а*, *б*, *в*) и K_{con} (г) при указанных фиксированных значениях двух из четырех факторов для первого эксперимента

Fig. 5. Response surfaces η_A (*a*, *b*, *c*) and K_{con} (*d*) for the indicated fixed values of two of the four factors for the first experiment

Перспективным с точки зрения использования при адаптивном управлении является учет влияния параметров управления (ω_1) и цепей схемы замещения (L_1 / L_2) на эффективность программного задания температуры в соответствии с технологической картой приготовления продукта. Здесь целевая

функция в экстремуме улучшает показатель управляемости K_{con} примерно на 5 % (рис. 5, *г*). Полученная количественная связь факторов и функций цели – гораздо более важный итог эксперимента помимо качественных оценок влияния факторов на цель. Возникает основание для включения в алгоритм управления объектом оптимизационных процедур (см. рис. 1, блок 3).

Источником искаженных представлений о характере влияния тех или иных факторов на цель эксперимента могут явиться небольшие интервалы изменения величин факторов, влияющих на процесс нагрева жидкой среды. Поэтому был поставлен второй эксперимент с расширенным диапазоном изменения значений факторов при сокращении их числа и исключении дополнительных соотношений взаимозависимости в изменении параметров схем замещения (по сравнению с табл. 1). Для второго эксперимента в качестве факторов включены: частота питающей сети $(x_1 = \omega_1)$, активное сопротивление схемы замещения контура токов Фуко $(x_2 = R_2)$, теплоемкость жидкой среды $(x_3 = C_3)$ и коэффициенты теплопередачи от субъектов процесса к окружающей среде $(x_4 = A_{j4}$, при j = 1, 2, 3).

Третий и четвертый факторы добавлены для оценки влияния на процесс типа объекта нагрева и возможности обоснованного планирования мероприятий по теплоизоляции индуктора, вторичного тела и жидкой среды.

На рис. 6 в графической форме показаны интервалы изменения факторов (x_i) и нормированного их представления X_i при i = 1 – 4.

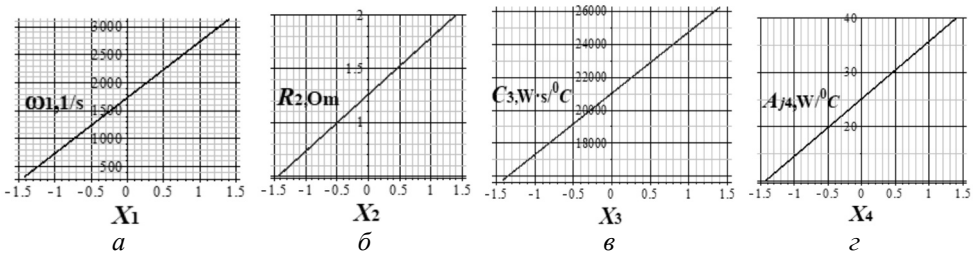


Рис. 6. Результат нормализации четырех факторов

Fig. 6. Result of normalization of four factors

Целевые функции сохранены прежними (2)–(4). План второго эксперимента соответствует рис. 4. Значимые коэффициенты регрессий собраны в табл. 3.

На рис. 7 показаны сечения регрессионных зависимостей при указанных значениях стабилизированных факторов. Выбор факторов, оставленных на фиксированном уровне, осуществлен по признаку меньшей значимости их влияния на результат.

Поверхность отклика по соотношению полной и активной составляющих потребляемой мощности устройством $(\eta_A$, рис. 7, *а*) показывает определяющую значимость только одного из четырех факторов – частоты питающей сети $(x_1 = \omega_1)$. С ростом частоты устройство начинает потреблять значительную ре-

активную мощность, причем со значительной потерей управляемости процессом (K_{con}, рис. 7, *б*) при фиксированном виде коррекции (см. рис. 2, *в*) и усиливающем эти тенденции росте теплоемкости нагреваемой жидкой среды ($x_3 = C_3$).

Таблица 3

Table 3

Коэффициенты регрессий для второго эксперимента

Regression coefficients for the second experiment

Коэффициенты регрессии для η_A				
b_0	b_1	b_4	b_{44}	b_{14}
0,582	–0,301	–0,0238	0,0115	–0,0075

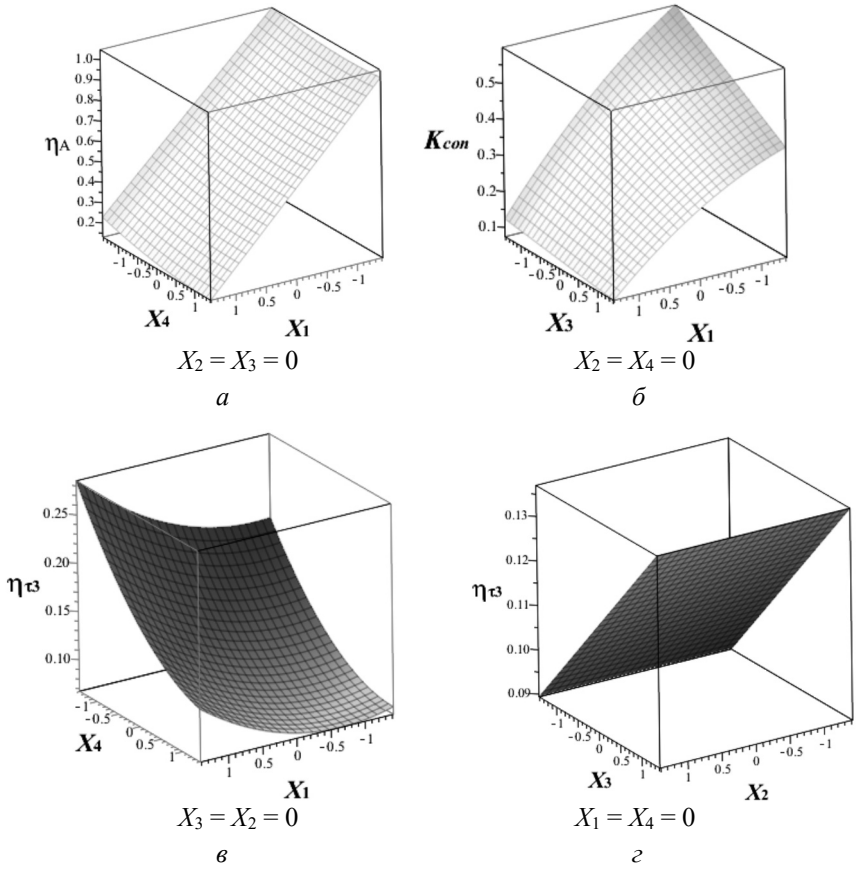
Коэффициенты регрессии для $\eta_{\tau 3}$								
b_0	b_1	b_3	b_4	b_{11}	b_{44}	b_{13}	b_{14}	b_{34}
0,113	0,0237	0,0168	–0,051	0,013	0,0155	0,0025	–0,005	–0,005

Коэффициенты регрессии для K_{con}						
b_0	b_1	b_3	b_4	b_{11}	b_{13}	b_{14}
0,334	–0,138	–0,0476	–0,0363	–0,02	0,0213	–0,00875

Ожидаемым является результат влияния качества теплоизоляции устройства ($x_4 = A_{j4}$ при j = 1, 2, 3) на эффективность использования активной мощности, потребляемой нагревателем: улучшение теплоизоляции ведет к росту КПД. А вот то, что эта взаимосвязь фактора $x_4 = A_{j4}$ и целевой функции $\eta_{\tau 3}$ усиливается на повышенных частотах, изначально не очевидно (рис. 7, *в*).

Последняя реплика целевой функции $\eta_{\tau 3}$ (рис. 7, *г*) показывает существенную связь КПД с теплоемкостью жидкой среды. Кроме формирования качественного представления о процессе, выводов по структуре алгоритма управления, по результатам эксперимента может быть произведен полезный для проектанта количественный анализ. Например, можно оценить, какие материальные затраты в денежном выражении на улучшение теплоизоляции оправданы в период службы устройства с точки зрения потребителя. По результатам второго эксперимента при активной мощности устройства 15 кВт, продолжительности включения 10 % и сроке эксплуатации 6 лет стоимость потребленной нагревателем энергии будет равна Ц = 0,1 · 24 · 364 · 6 · 4,85 = = 25421,76 руб., где 4,85 руб/кВт – тариф продаж электроэнергии для населения [15]. При выигрыше в КПД по рис. 7, *в* на 17 пунктов имеем сэкономленную сумму: $Ц_1 = Ц \cdot 0{,}17 = 4321{,}699$ руб. Эти средства могут быть оправданно использованы для четырехкратного уменьшения коэффициента теплоотдачи во внешнюю среду от конструктивных элементов нагревателя (рис. 6, *в*). Так, при желании каждое конструкторское решение может быть подвергнуто экономическому обоснованию.

Материал итогов эксперимента частично касается разработки содержательной части блоков 3, 6, 7 (см. рис. 1). Работа по реализации оставшихся составляющих структуры идет, и результат по каждому из фрагментов имеет разную степень готовности. Разработчики посчитали, что алгоритм управления не является искусственно усложненным.



$X_2 = X_3 = 0$ *а*

$X_2 = X_4 = 0$ *б*

$X_3 = X_2 = 0$ *в*

$X_1 = X_4 = 0$ *г*

Рис. 7. Поверхности отклика η_A (*а*), K_{con} (*б*) и $\eta_{\tau 3}$ (*в*, *г*) при указанных фиксированных значениях двух из четырех факторов для второго эксперимента

Fig. 7. Response surfaces η_A (*a*), Kcon (*b*) and $\eta_{\tau 3}$ (*c*, *d*) for the indicated fixed values of two of the four factors for the second experiment

Использование цифровой техники, микроконтроллера позволяет решать технологические задачи с новым качеством результата. Значительные величины постоянных времени технологического процесса способствуют выполнению сложных алгоритмов управления в реальном масштабе времени. Важно также постоянное удешевление микроконтроллеров, среди которых даже контроллеры общепромышленного назначения имеют значительный ресурс, разнообразный состав аппаратной части. Кроме того, из-за очевидной взаимозависимости физических процессов, происходящих в нагревателе, результатов решения задач управления, обозначенных блоками структурной схемы программно-аппаратной реализации САР (см. рис. 1), ожидается проявление синергетического эффекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенной работы была предложена общая структура программно-аппаратного обеспечения индукционного устройства для нагрева жидкой среды; предложена математическая модель, предназначенная для расчетов тепловых и электромагнитных процессов в рассматриваемой индукционной установке; выполнен эксперимент с выбором интересующих факторов, формулировкой целевых функций с использованием теории планирования эксперимента для получения регрессионных соотношений синтеза индуктора, состава оптимизационных процедур, реализуемых программным обеспечением микроконтроллера, и обоснования необходимости идентификационных процедур.

В ходе работы подверглись анализу математические модели в программном комплексе Maple.

Исходя из результатов проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Нелинейная математическая модель дополняет линеаризованную, подтверждает анализ результатов ее работы и благодаря полному моделированию тепловых и электротехнических процессов дает базу для всестороннего анализа режимов работы нагревателя, в том числе и энергетических показателей.

2. Использование теории планирования эксперимента позволяет построить регрессионные модели для ряда целевых функций, охватывающих энергетическую и технологическую эффективность работы устройства. Предлагаются целевые функции по анализу работы устройства по отношению к питающей сети (2), эффективности использования активной составляющей потреблённой энергии (3), способности к сохранению управляемости устройства, как элемента САР (4).

3. Регрессионные модели являются основой качественного и количественного анализа влияния технологических и конструктивных параметров на результат управления процессом нагрева жидкой среды, составляют базу для планирования экономически оправданных мероприятий по улучшению потребительских свойств нагревателя.

4. Для повышения качества САР необходимо включение в алгоритм работы контроллера управления процедуры идентификации параметров установки, меняющихся в процессе ее работы, ненаблюдаемых и влияющих на параметры корректирующего устройства и энергетическую эффективность (блок 2 на рис. 1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ларькина Т.С., Льготчиков В.В., Леневский Г.С.* Параметрическая идентификация параметров среды системы косвенного индукционного нагрева жидкости // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 3 (76). – С. 117–125. – DOI: 10.53078/20778481_2022_3_117.

2. *Ларькина Т.С.* Моделирование индукционного нагрева изотермического контейнера // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 7 (38). – С. 67–69.

3. *Льготчиков В.В., Денисов В.Н., Ларькина Т.С.* Алгоритм работы контроллера управления электромагнитным процессом в длинной линии // Программные продукты и системы. – 2018. – Т. 31, № 4. – С. 798–802.

4. *Dolgikh I., Korolev A., Zakharov V.* Temperature processes of induction heating simulation // Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach. Vol. 5. Technical Sciences. – San Francisco, Calif., 2014. – P. 68–74.

5. *Горнов А.О.* Нагревание и охлаждение электрических двигателей. – М.: МЭИ, 1980. – 56 с.

6. *Дилигенская А.Н., Рапопорт Э.Я.* Аналитические условия оптимальности в обратных задачах теплопроводности // Теплофизика высоких температурю – 2021. – Т. 59 (3). – С. 401–410.

7. *Ильинский Н.Ф.* Элементы теории эксперимента. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МЭИ, 1983. – 92 с.

8. *Дрейпер Н.* Прикладной регрессионный анализ. – М.: Вильямс, 2019. – 912 с.

9. *Выгодчикова И.Ю.* Алгоритм оценки параметров линейной множественной модели регрессии по минимаксному критерию. – М.: Синергия, 2019. – 216 с.

10. *Дьяконов В.П.* Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах. – М.: ДМК-Пресс, 2011. – 80 с.

11. *Топчеев Ю.И.* Атлас для проектирования систем автоматического регулирования. – М.: Машиностроение, 1989. – 752 с.

12. *Льготчиков В.В., Ларькина Т.С.* Синтез системы автоматического регулирования температуры жидкости с улучшенными динамическими показателями // Вестник МЭИ. – 2019. – № 5. – С. 73–80.

13. *Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012. – 309 с.

14. *Льготчиков В.В.* Регрессионный анализ результатов экспериментов: свидетельство о регистрации базы данных № 2005620067. – М.: РОСПАТЕНТ, 2005.

15. Постановление от 18.11.2022 № 94 «Об установлении тарифов на электрическую энергию для населения Смоленской области» / Департамент Смоленской области по энергетике, энергоэффективности, тарифной политике. – Смоленск, 2022. – 13 с.

Льготчиков Валерий Вениаминович, доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет “МЭИ”» в г. Смоленске, кафедра электромеханических систем. Основное направление научных исследований – микропроцессорный электропривод, системы управления, идентификация параметров, надежность электротехнических комплексов, методы оптимизации. Имеет более 40 печатных работ. E-mail: vvldrive@yandex.ru

Ларькина Татьяна Сергеевна, старший преподаватель Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет “МЭИ”» в г. Смоленске, кафедра электромеханических систем. Основное направление научных исследований – идентификация параметров, системы управления, индукционный нагрев, методы оптимизации. Имеет более 25 печатных работ. E-mail: tatyana.larkina.2015@yandex.ru

Lgotchikov Valeriy V., DSc (Engineering), professor at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research University “MPEI”» in the Smolensk, Department of Electro-Mechanical Systems. His research interests are currently focused on microprocessor electric drive, control systems, identification of parameters, reliability of electrical systems, and optimization methods. He has more than 40 publications. E-mail: vvldrive@yandex.ru

Larkina Tatyana S., senior lecturer at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research University “MPEI”» in the Smolensk, Department of Electromechanical Systems. Her research interests are currently focused on identification of parameters, control systems, induction heating, and optimization methods. She has more than 25 publications. E-mail: tatyana.larkina.2015@yandex.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-87-104

Designing an induction device for heating a liquid medium *

V.V. LGOTCHIKOV [a], *T.S. LARKINA* [b]

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research University "MPEI"» in Smolensk, 1 Energy Driveway, Smolensk, 214013, Russian Federation

[a] *vvldrive@yandex.ru* [b] *tatyana.larkina.2015@yandex.ru*

Abstract

The design of induction devices for heating a liquid medium is an urgent task in modern industry. Induction heating is an efficient and economical way to provide uniform and rapid heating of a liquid without the need for direct contact with the heating element. It finds wide application in various industries such as metallurgy, oil and gas, food processing, medicine and scientific research. The design of induction devices for heating a liquid medium requires taking into account many factors, such as the properties of a liquid, the parameters of the induction coil, the type of power source, and others. One of the main advantages of induction heating is the ability to precisely control heating and its efficiency, which can reduce energy costs and increase the productivity of production processes. In this regard, the design of induction devices for heating a liquid medium is of great importance in modern industry and science, allowing an increase in the productivity and quality of production processes, as well as reducing energy costs and improving production safety.

This article proposes a general structure of the software and hardware for an induction device for heating a liquid medium. A mathematical model is proposed for calculating thermal and electromagnetic processes in the considered induction installation. An experiment was carried out with a choice of factors of interest, the formulation of objective functions using the theory of experiment planning to obtain regression relations for the synthesis of an inductor, as well as the composition of optimization procedures implemented by the microcontroller software, and to substantiate the need for identification procedures.

In the course of the work, mathematical models were analyzed in the Maple software package.

Keywords: induction heating, induction device, identification, liquid heating, control system, regulation, experiment planning theory, regression

REFERENCES

1. Larkina T.S., Lgotchikov V.V., Lenevsky G.S. Parametricheskaya identifikatsiya parametrov sredy sistemy kosvennogo induktsionnogo nagreva zhidkosti [Parametric identification of environment parameters of the system for indirect induction heating of liquids]. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta = The Belarusian-Russian university herald*, 2022, no. 3 (76), pp. 117–125. DOI: 10.53078/20778481_2022_3_117.

2. Larkina T.S. Modelirovanie induktsionnogo nagreva izotermicheskogo konteinera [Modeling induction heating of the insulated container]. Modeling of induction heating of an isothermal container. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal*, 2015, no. 7 (38), pp. 67–69.

3. Lgotchikov V.V., Denisov V.N., Larkina T.S. Algoritm raboty kontrollera upravleniya elektromagnitnym protsessom v dlinnoi linii [The algorithm of the controller for controlling the electromagnetic process in a long line]. *Programmnye produkty i sistemy = Software and Systems*, 2018, vol. 31, no. 4, pp. 798–802.

4. Dolgikh I., Korolev A., Zakharov V. Temperature processes of induction heating simulation. *Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach*. Vol. 5. *Technical Sciences*. San Francisco, Calif., 2014, pp. 68–74.

* *Received 17 May 2023.*

5. Gornov A.O. *Nagrevanie i okhlazhdenie elektricheskikh dvigatelei* [Heating and cooling of electric motors]. Moscow, MEI Publ., 1980. 56 p.

6. Diligenskaya A.N., Rapoport E.Ya. Analiticheskie usloviya optimal'nosti v obratnykh zadachakh teploprovodnosti [Analytical conditions for optimality in inverse problems of heat conduction]. *Teplofizika vysokikh temperatur = High Temperature*, 2021, vol. 59 (3), pp. 401–410. (In Russian).

7. Il'inskii N.F. *Elementy teorii eksperimenta* [Elements of the theory of experiment]. 2nd. ed.. rev. Moscow, MEI Publ., 1983. 92 p.

8. Draper N.R. *Prikladnoi regressionnyi analiz* [Applied regression analysis]. Moscow, Williams Publ., 2019. 912 p. (In Russian).

9. Vygodchikova I.Yu. *Algoritm otsenki parametrov lineinoi mnozhestvennoi modeli regressii po minimaksnomu kriteriyu* [Algorithm for estimating the parameters of a linear multiple regression model by the minimax criterion]. Moscow, Sinergiya Publ., 2019. 216 p.

10. D'yakonov V.P. *Maple 10/11/12/13/14 v matematicheskikh raschetakh* [Maple 10/11/12/13/14 in mathematical calculations]. Moscow, DMK-Press, 2011. 800 p.

11. Topcheev Yu.I. *Atlas dlya proektirovaniya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Atlas for the design of automatic control systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 752 p.

12. Lgotchikov V.V., Larkina T.S. Sintez sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya temperatury zhidkosti s uluchshennymi dinamicheskimi pokazatelyami [Synthesis of a system for automatic control of liquid temperature with improved dynamic performance]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta = Bulletin of MPEI*, 2019, no. 5, pp. 73–80.

13. Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E. *Optimal'noe upravlenie temperaturnymi rezhimami induktsionnogo nagreva* [Optimum control of temperature regimes of induction heating]. Moscow, Nauka Publ., 2012. 309 p.

14. Lgotchikov V.V. *Regressionnyi analiz rezul'tatov eksperimentov* [Regression analysis of experimental results]. The Certificate on official registration of the database. No. 2005620067, 2005.

15. *Postanovlenie ot 18.11.2022 № 94 «Ob ustanovlenii tarifov na elektricheskuyu energiyu dlya naseleniya Smolenskoi oblasti»* [Postanovlenie dated 11.18.2022 No. 94 “Ob ustanovlenii tarifov na elektricheskuyu energiyu dlya na-seleniya Smolenskoi oblasti”]. Department of the Smolensk Region for Energy, Energy Efficiency, Tariff Policy. Smolensk, 2022. 13 p.

Для цитирования:

Льготчиков В.В., Ларькина Т.С. Проектирование индукционного устройства для нагрева жидкой среды // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 3 (91). – С. 87–104. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-87-104.

For citation:

Lgotchikov V.V., Larkina T.S. Proektirovanie induktsionnogo ustroistva dlya nagreva zhidkoi sredy [Designing an induction device for heating a liquid medium]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 3 (91), pp. 87–104. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-87-104.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 91, № 3, 2023, с. 105–120

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 91, No. 3, 2023, pp. 105–120

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

УДК 681.2

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-105-120

Электромагнитная система для деструкции биологических тканей на частоте 27,12 МГц*

С.В. БЕЛАВСКАЯ[a], Л.И. ЛИСИЦЫНА[b], В.П. РАЗИНКИН[c], Е.К. ВИНСКАЯ[d], В.А. ХРУСТАЛЁВ[e], А.Н. КУЗЬМИН[f], А.В. МАРКОВ[g]

630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

[a] *Svetlana.belana@yandex.ru* [b] *lisitcinali@gmail.com* [c] *razinkin_vp@mail.ru*
[d] *katerinavns@gmail.com* [e] *va_khrustalev@ngs.ru* [f] *anton@kuz-min.ru*
[g] *markovav@corp.nstu.ru*

Представлены результаты исследования деструкции биологических тканей высокочастотным электромагнитным излучением на разрешенной частоте 27,12 МГц в сравнении с деструкцией на разрешенной частоте 13,56 МГц при одинаковой мощности воздействующего излучения 30 Вт. Сегодня все известные приборы высокочастотной электромагнитной деструкции на частоте 27,12 МГц используются для проведения поверхностных неглубоких операций (удаление папиллом, родинок и т. д.). Разработка высокочастотной электромагнитной системы для деструкции глубоких, плотных тканей (костных, хрящевых), а также злокачественных новообразований на указанной частоте является актуальнейшей задачей современности. Для проведения исследования на указанной частоте разработана и реализована экспериментальная установка на современной элементной базе, отличительная особенность которой – обеспечение стабильной и надежной работы используемых транзисторных усилителей мощности при сохранении их работоспособности в широком диапазоне изменения нагрузки (от холостого хода до короткого замыкания). Эта особенность реализована за счет использования двухканального мостового усилительного тракта. Для испытания работоспособности установки использован мультиметр с функцией тепловизора и измеритель иммитанса. Форма выходного сигнала установки – синусоида, вторая гармоника ослаблена по отношению к основной на 60 дБ. Исследования проведены in vitro на биоптатах мышечных, костных тканей и печени крупного рогатого скота, а также на свином кожном покрове. Разрезы биологической ткани, выполненные на частоте 27,12 МГц, имеют глубокую коагуляцию, а на частоте 13,56 МГц в месте коагуляции уже наблюдается карбонизация мышечной ткани; деструкция костной ткани и печени на частоте 27,12 МГц более ярко выражена, на частоте 13,56 МГц в области деструкции появляются элементы карбонизации; воздействие высокочастотным излучением на частоте 27,12 МГц происходит с меньшим влиянием на окружающие ткани, чем на частоте 13,56 МГц; проколы мышечной ткани и печени, выполненные на разных частотах, практически не различаются; температура в области электрического разряда, возникающая на частоте 27,12 МГц при мощности излучения 30 Вт, выше

* *Статья получена 13 февраля 2023 г.*

150 °С (на частоте 13,56 МГц – 126 °С); температуру в области разряда на частоте 27,12 МГц можно снизить до температуры, как на частоте 13,56 МГц, уменьшив мощность электромагнитного излучения в 1,5 раза.

Ключевые слова: биологическая ткань, деструкция, разряд высокочастотный, абляция, 27,12 МГц, коагуляция, карбонизация, температура, вторая гармоника

ВВЕДЕНИЕ

Деструкция биологических тканей широко используется в медицинской практике (в косметологии, ортопедии, травматологии, хирургии и др.) [1–21]. Современные способы абляции, основанные на повышении температуры биологической ткани, – радиочастотная (РЧА) и микроволновая (МВА). РЧА и МВА имеют свои достоинства и недостатки. Их недостатки можно ликвидировать, выполняя процесс абляции на высокой частоте от 3 до 30 МГц в соответствии с ГОСТ Р 52002-2003 и ГОСТ Р 51318.11-99 (СИСПР 11-97). Авторами статьи [22] проведены исследования на разрешенной частоте 13,56 МГц, показавшие возможность выполнения резекции и коагуляции биологических тканей (БТ) воздействующим электромагнитным излучением на этой частоте. Показано, что результат достигается высокой скоростью практически при минимальном воздействии на окружающие ткани.

Сегодня считается, что микроволновая абляция (частоты 945…2450 МГц) предпочтительнее радиочастотной абляции (частоты до 500 кГц) и обладает рядом преимуществ [22].

Однако использование метода МВА на практике затруднено в связи с высоким нагревом антенны, с воздействием СВЧ-излучения, вредного для организма человека, и с высокой стоимостью систем микроволновой абляции (до 7 млн руб.).

Существующие системы высокочастотной электромагнитной деструкции в настоящее время используются для проведения поверхностных, неглубоких операций [23]. Поэтому разработка высокочастотной электромагнитной системы для абляции глубоких и плотных тканей, а также злокачественных новообразований – актуальная задача современности.

1. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Провести исследование использования высокочастотного электромагнитного излучения на частоте 27,12 МГц для деструкции глубокорасположенных, костных и хрящевых биологических тканей. С этой целью разработать и реализовать генератор стоимостью не более 1 млн рублей на указанную частоту на современной элементной базе. Провести экспериментальные исследования и сравнить полученные результаты с экспериментальными результатами деструкции на частоте 13,56 МГц.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

2.1. ОСНОВНЫЕ ПРИБОРЫ, УСТРОЙСТВА И БИОПТАТЫ

1. Высокочастотный генератор (27,12 МГц).

Требуемые параметры разрабатываемого генератора:

- рабочая частота – 27,12 МГц,

• мощность – 50…100 Вт, в рабочей зоне – 30…60 Вт,

• форма выходного сигнала – синусоида,

• допустимо ослабление второй гармоники выходного сигнала по отношению к основной не менее чем на 50 дБ,

• изменение параметров при изменении условий внешней среды не более 5 %,

• допустимый уровень радиопомех.

2. ВЧ-генератор с рабочей частотой 13,56 МГц, параметры которого указаны в [22].

3. Медицинский хирургический инструмент (излучатель – игла из медицинской стали).

4. Осциллограф типа OWON PDS 5022S.

5. Спектроанализатор HAMEG 5510.

6. Мультиметр типа CEM DT-898 с функцией тепловизора.

7. Мультиметр типа Tonghui TH2822A.

8. Биоптаты – кожный покров, мышечные и костные ткани и печень животных [17].

2.2. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Структурная схема разработанной высокочастотной электромагнитной системы представлена на рис. 1.

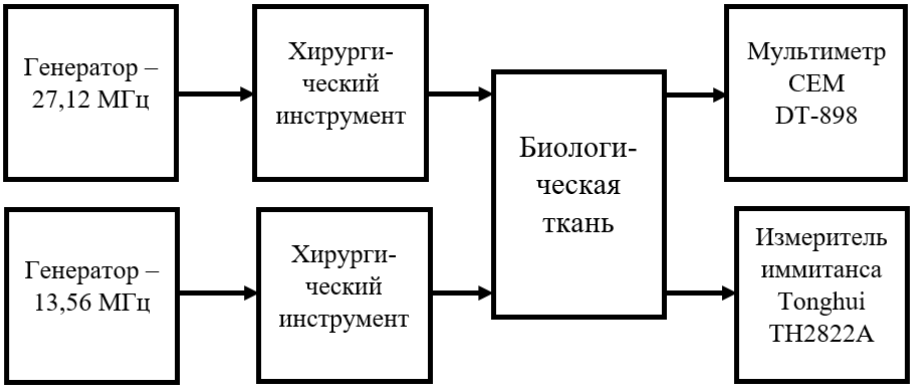


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Scheme of the experimental setup

2.2. РАЗРАБОТКА ВЧ-ГЕНЕРАТОРА НА РАБОЧУЮ ЧАСТОТУ 27,12 МГЦ НА СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ

Отличительная особенность разрабатываемого генератора – обеспечение стабильной и надежной работы используемых транзисторных усилителей мощности при сохранении их работоспособности в широком диапазоне изменения нагрузки (от холостого хода до короткого замыкания). Эту особенность предлагается реализовать за счет использования двухканального мостового усилительного тракта.

В разработанном двухканальном усилителе с выходной мощностью 100 Вт, выполненном по мостовой структуре, используются делитель и сумматор ВЧ-сигналов, каждый из которых реализован на двух одинаковых отрезках коаксиальной линии передачи со стандартным волновым сопротивлением 75 Ом. Физическая длина отрезков коаксиальной линии передачи определяется отношением

$$L = \frac{0{,}196\lambda}{\sqrt{\varepsilon_p}}, \tag{1}$$

где L – длина отрезков коаксиальной линии передачи; λ – длина волны, соответствующая рабочей частоте f; ε_p – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика отрезков линий передачи.

Развязка между выходами делителя (входами сумматора) ВЧ-сигналов обеспечивается балластной нагрузкой в виде планарного пленочного резистора на подложке из бериллиевой керамики. Для компенсации влияния паразитной емкости планарного пленочного резистора на входе делителя и на выходе сумматора установлен конденсатор, емкость которого равна

$$C = \frac{\sqrt{2}}{2\pi f R_0}, \tag{2}$$

где R_0 – входное сопротивление делителя (сумматора) ВЧ-сигналов.

Соотношения (1) и (2) получены методом четного и нечетного возбуждения с учетом выполнения режима согласования как по входу, так и по выходу делителя (сумматора) ВЧ-сигнала.

Предложена и реализована структурная схема ВЧ-генератора на частоту 27,12 МГц (рис. 2).

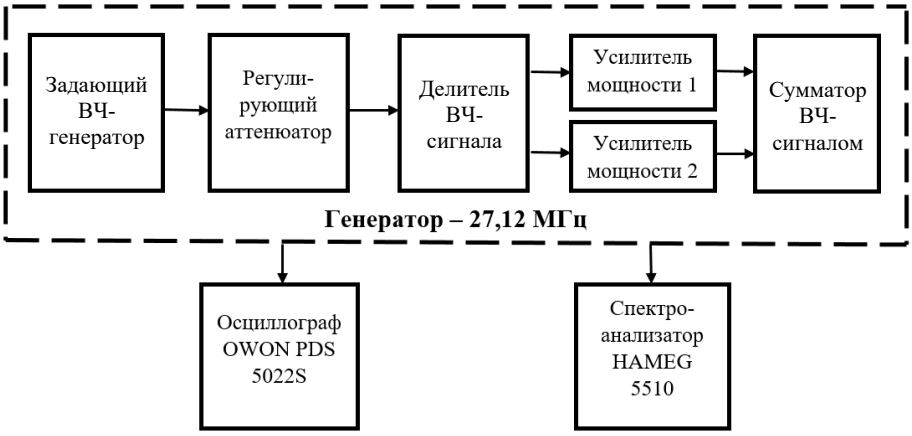


Рис. 2. Схема ВЧ-генератора на частоту 27,12 МГц

Fig. 2. Scheme of the RF generator at a frequency of 27.12 MHz

Параметры разработанного генератора соответствуют заданным. Форма выходного сигнала – синусоида (рис. 3).

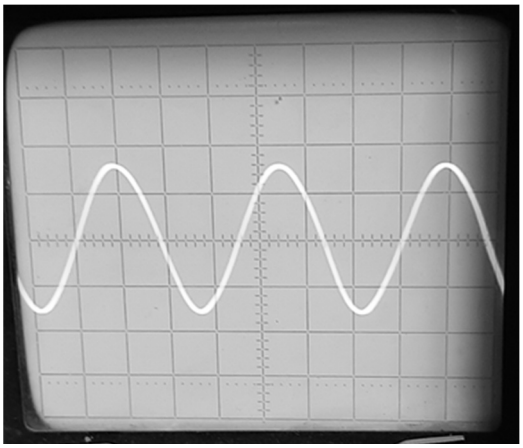


Рис. 3. Выходной сигнал генератора

Fig. 3. Generator output

На рис. 4 представлена картина частотного спектра выходного сигнала генератора, полученная с помощью спектроанализатора HAMEG 5510, откуда видно, что вторая гармоника выходного сигнала ослаблена на 60 дБ по отношению к основной, что соответствует техническому заданию.

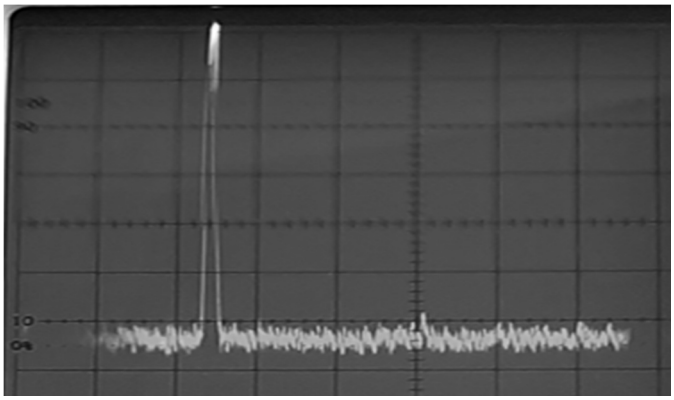


Рис. 4. Картина спектра выходного сигнала генератора

Fig. 4. Spectrum pattern of the oscillator output signal

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проведены in vitro на биоптатах на частотах 27,12 МГц и 13,56 МГц (для сравнения) при одинаковой мощности воздействующего излучения 30 Вт.

Результаты исследований приведены на нижерасположенных рисунках, где индекс 1 – при частоте 27,12 МГц, индекс 2 – при частоте 13,56 МГц.

Абляция проведена неинвазивным и инвазивным способами. При проведении инвазивной абляции использован излучатель – стальной стержень диаметром около 1,3 мм. Абляция неинвазивным способом выполнена сканированием излучателя по поверхности образца.

Изменение структуры биотканей оценивалось по динамике электрического сопротивления.

На рис. 5 представлена фотография свиного кожного покрова с разрезами, выполненными за 5 секунд. Начальное сопротивление биоптата – 600 Ом. На фотографии видно, что разрезы практически не отличаются, однако на краях разреза на частоте 13,56 МГц карбонизация произошла в большей степени. Это подтверждается измерением электрического сопротивления: в области разреза 1 сопротивление составляет 1,1 кОм, в области разреза 2 сопротивление будет 1 кОм. На расстоянии 1 мм от каждого из разрезов электрическое сопротивление составляет 800 Ом, а на расстоянии 2 мм – уже 600 Ом. Следовательно, разрезы выполнены почти без влияния на окружающие участки.

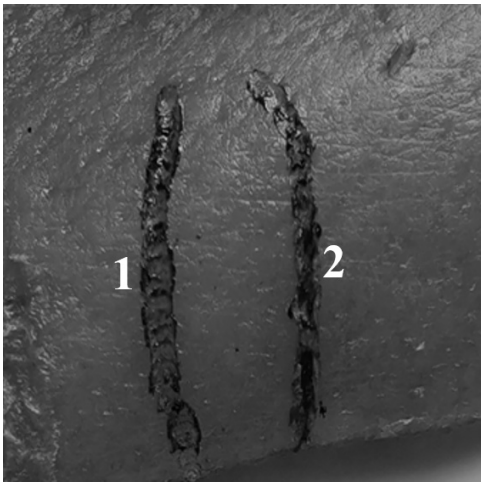


Рис. 5. Фотография свиного кожного покрова с разрезами

Fig. 5. Photo of pig skin with incisions

Также были проведены разрезы биологических тканей (БТ) (рис. 6) с начальным электрическим сопротивлением 700 Ом. Разрезы выполнены за 3 секунды каждый.

На рис. 6 явно видно, что на частоте 27,12 МГц разрез имеет глубокую коагуляцию, а на частоте 13,56 МГц на месте коагуляции уже наблюдается карбонизация мышечной ткани. Это же подтверждается на зависимости электрического сопротивления от расстояния до разреза (центр разреза – исследуемая точка), график которого представлен на рис. 7. При воздействии полем на частоте 27, 12 МГц окружающие участки ткани вокруг разреза затронуты в меньшей степени, чем на частоте 13,56 МГц.

Далее была исследована высокочастотная абляция инвазивным способом мышечной ткани (толщиной 7 мм) и печени (толщиной 15) мм крупного рогатого скота (рис. 8). Все проколы выполнены за 5 секунд, глубина прокола – на всю толщину образца, диаметр прокола 2 мм, область абляции вокруг прокола ~1,5 мм. Начальное электрическое сопротивление мышечной ткани составляет 2 кОм, в области абляции – 7 кОм (в обоих случаях). Начальное электрическое сопротивление печени – 4 кОм; после обработки высокочастотным излучением, так же как и у мышечных тканей, сопротивление в области абляции

в обоих случаях составляет 9 кОм. Следовательно, результаты инвазивной высокочастотной абляции методом прокола при частотах 13,56 МГц и 27,12 МГц практически не отличаются.

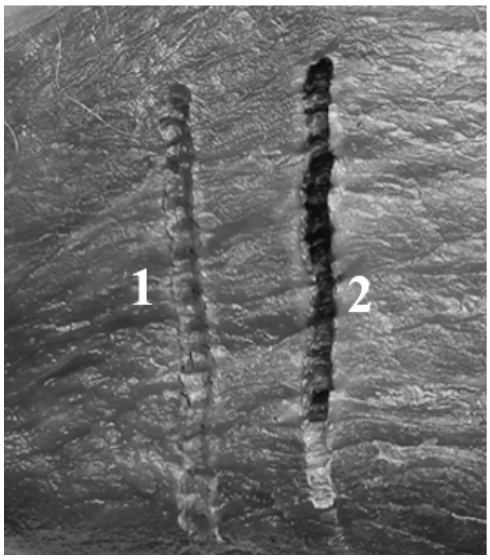


Рис. 6. Фотография мышц крупного рогатого скота с разрезами

Fig. 6. Photo of cattle muscles with incisions

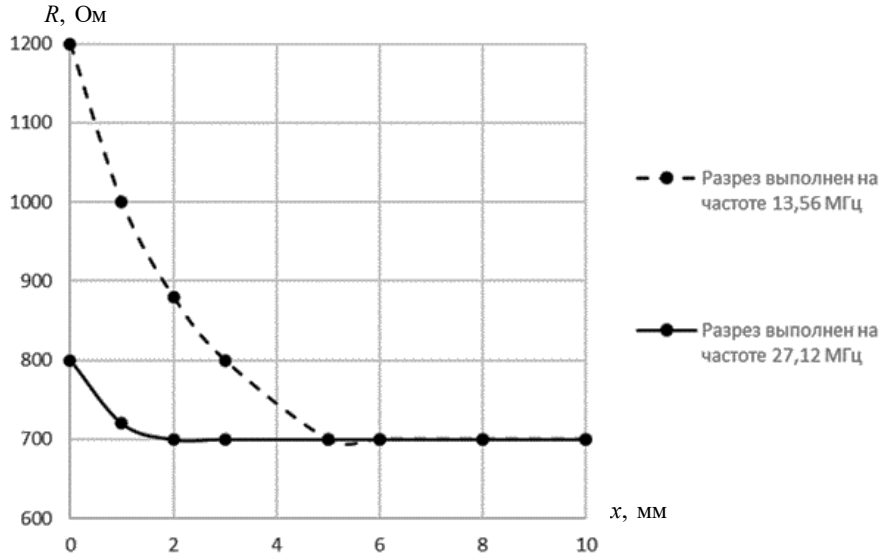
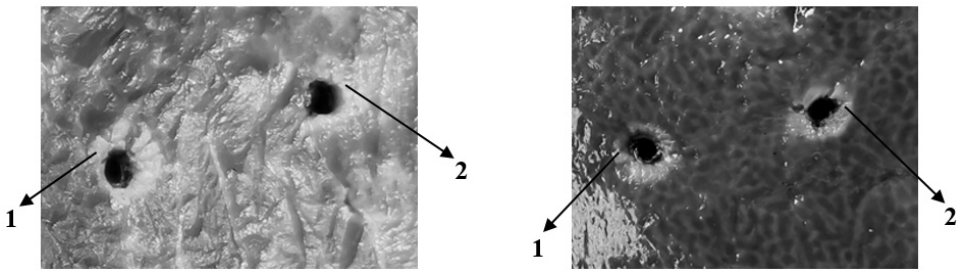


Рис. 7. Зависимость изменения электрического сопротивления мышечной ткани от расстояния (центр разреза – исследуемая точка)

Fig. 7. The dependence of the change in the electrical resistance of muscle tissue on the distance (the center of the incision is the point under study)



а *б*

Рис. 8. Фотографии участков мышц (*а*) и печени (*б*) крупного рогатого скота с проколами

Fig. 8. Photos of muscle (*a*) and liver (*b*) areas of cattle with punctures

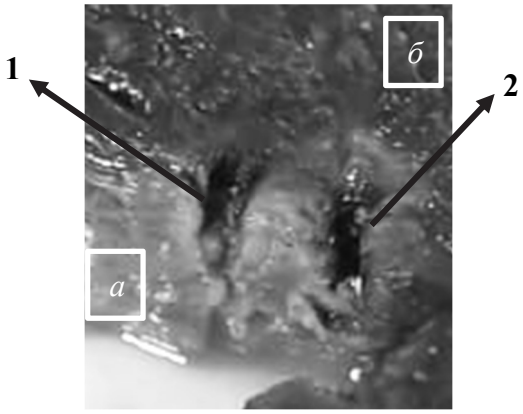


Рис. 9. Фотографии биоптата мышечной ткани с проколами в разрезе:

а – область среза, *б* – поверхность биоптата

Fig. 9. Muscle biopsy photos muscle tissue with punctures in the section:

1 is the area of the cut, *2* is the surface of the biopsy

На фотографии биоптата печени (рис. 10) абляция выполнена за 30 секунд каждая неинвазивным способом на разных частотах. Площадь абляции составляет 1…1,5 см^2. При деструкции на частоте 13,56 МГц проявляется заметная карбонизация ткани, тогда как на частоте 27,12 МГц имеется только коагуляция.

Исследование зависимости электрического сопротивления от расстояния до области деструкции представлено на рис. 11. Из графика видно, что деструкция на частоте 13,56 МГц в большей степени воздействует на окружающие ткани.

Абляция костной ткани также проведена неинвазивным способом (рис. 12). Время выполнения абляции на площади 1 см^2 на каждой из частот составляет 60 секунд. Результаты проведенных деструкций аналогичны результатам на печени. Начальное электрическое сопротивление костной ткани составляло 20 кОм, однако после воздействия в обоих случаях сопротивление стало более 100 МОм.

R, кОм

Рис. 10. Фотография участка печени с деструкцией

Fig. 10. Photo of a section of the liver with destruction

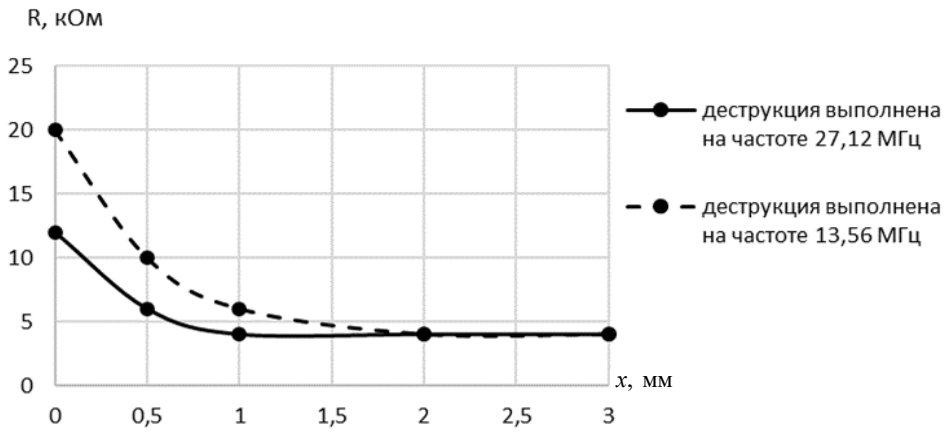


Рис. 11. Зависимость электрического сопротивления говяжьей печени от расстояния (граница деструкции – исследуемая точка)

Fig. 11. Dependence of the electrical resistance of beef liver on the distance (the destruction boundary is the point under study)

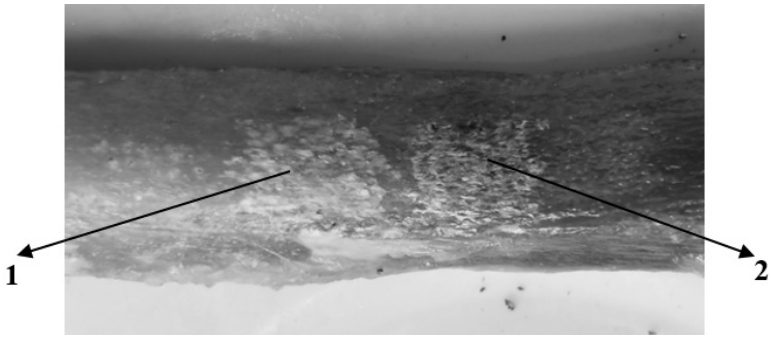
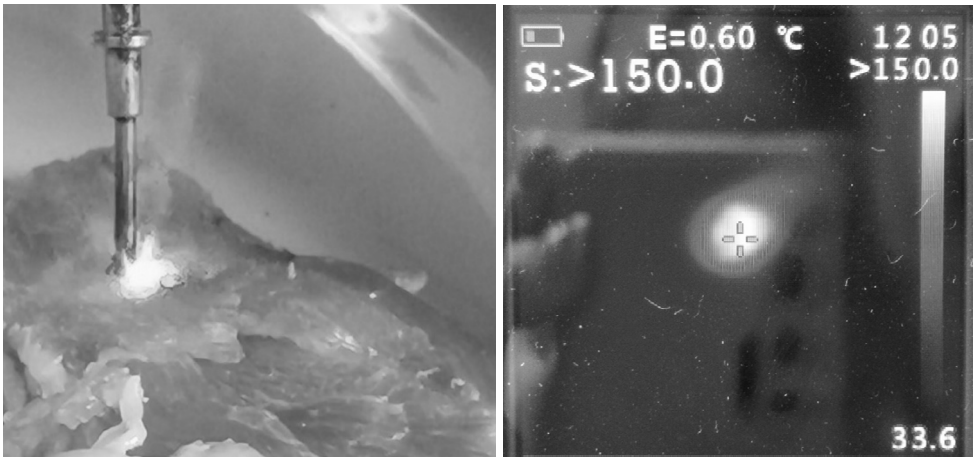


Рис. 12. Фотография костной ткани с областями деструкции

Fig. 12. Photo of bone tissue with areas of destruction

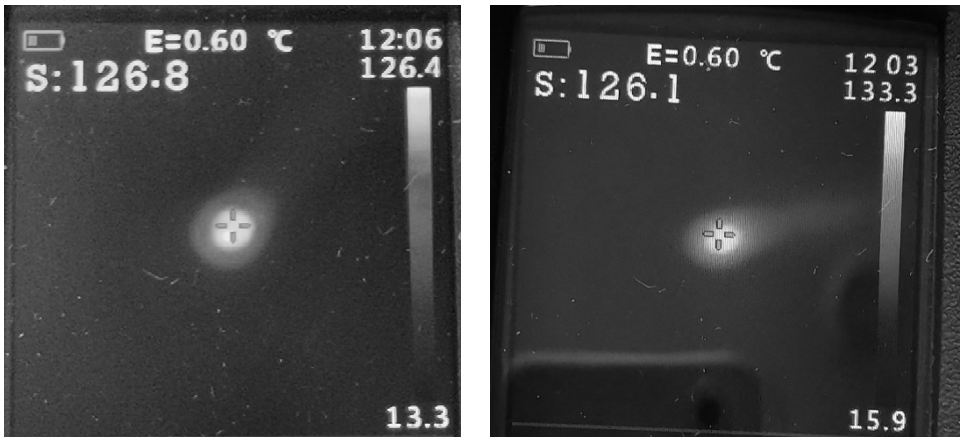
На рис. 13 представлена фотография разряда между излучателем и биоптатом, а также фотография фиксации участка разряда на экране мультиметра при мощности воздействующего сигнала 30 Вт.



а *б*

Рис. 13. Фотография разряда между излучателем и биоптатом мышечной ткани при осуществлении абляции на частоте 27,12 МГц (*а*), фотография участка разряда на экране мультиметра (*б*)

Fig. 13. Photo of the discharge between the emitter and the biopsy muscle tissue during ablation at a frequency of 27.12 MHz (*a*), photo of the discharge area on the multimeter screen (*b*)



а *б*

Рис. 14. Фотографии фиксации участка разряда на экране мультиметра при воздействии излучением:

а – 13,56 МГц при мощности излучения 30 Вт; *б* – 27,12 МГц при мощности излучения 20 Вт

Fig. 14. Photos of fixing the discharge area on the multimeter screen when exposed to electromagnetic radiation:

a – 13.56 MHz at a radiation power of 30 watts; *b* – 27.12 MHz at a radiation power of 20 watts

Фотография с разрядом, выполненным на частоте 13,56 МГц, практически не отличается от рис. 13, *а*. Но температура в области разряда при этом 126,8 °С (рис. 14, *а*). На биоптате при воздействии электромагнитным излучением на частоте 27,12 МГц можно получить такую же температуру (рис. 14, *б*), как при воздействии излучением на частоте 13,56 МГц, уменьшив мощность воздействующего излучения до 20 Вт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ приведенных фотографий и графиков позволяет сделать следующие выводы.

1. Разрезы биологической ткани, выполненные на частоте 27,12 МГц, имеют глубокую коагуляцию, а на частоте 13,56 МГц в месте коагуляции уже наблюдается карбонизация мышечной ткани.

2. Деструкция костной ткани и печени на частоте 27,12 МГц более ярко выражена, на частоте 13,56 МГц в области деструкции появляются элементы карбонизации.

3. Воздействие высокочастотным излучением на частоте 27,12 МГц происходит с меньшим влиянием на окружающие ткани, чем на частоте 13,56 МГц.

4. Проколы мышечной ткани и печени, выполненные на разных частотах, практически не различаются.

5. Температура в области электрического разряда, возникающая на частоте 27,12 МГц при мощности излучения 30 Вт, выше 150 °С (на частоте 13,56 МГц – 126 °С).

6. Температуру в области разряда на частоте 27,12 МГц можно снизить до температуры, как на частоте 13,56 МГц, уменьшив мощность электромагнитного излучения в 1,5 раза.

Согласно выводам, высокочастотную деструкцию из диапазона ВЧ (3…30 МГц) предпочтительнее использовать на разрешенной частоте 27,12 МГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные методы абляции злокачественных новообразований печени / Л.И. Москвичева, Д.В. Сидоров, М.В. Ложкин, Л.О. Петров, М.В. Забелин // Исследования и практика в медицине. – 2018. – Т. 5, № 4. – С. 58–71.

2. Новый метод микроволновой абляции злокачественных новообразований печени / Д.В. Сидоров, Н.А. Гришин, М.В. Ложкин, В.А. Вишневский, Л.О. Петров // Онкохирургия. – 2012. – Т. 4, № 1. – С. 50.

3. Микроволновая абляция при лечении злокачественных новообразований печени / Д.В. Сидоров, С.О. Степанов, Н.А. Гришин, М.В. Ложкин, Л.О. Петров, О.А. Майновска // Онкология. Журнал им. П.А. Герцена. – 2013. – № 2. – С. 27–31.

4. Effect of microwave ablation treatment of hepatic malignancies on serum cytokine levels / J. Zhao, Q. Li, M. Muktiali, B. Ren, Y. Hu, D. Li, Z. Li, D. Li, Y. Xie, M. Tao, R. Liang // BMC Cancer. – 2020. – Vol. 20. – P. 812.

5. Результаты радиочастотной абляции при лечении колоректальных метастазов в печени / К.Н. Петренко, Е.О. Барсукова, Л.О. Полищук, Е.П. Фисенко, Г.А. Шатверян, О.Г. Скипенко // Российский журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии. – 2007. – Т. 17, № 3. – С. 84–89.

6. Использование аппарата радиочастотной абляции при резекции печени / В.Д. Федоров, В.А. Вишневский, В.А. Кубышкин [и др.] // Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. – 2004. – № 5. – С. 21–25.

7. Microwave coagulation therapy for hepatic tumors: review of the literature and critical analysis / C. Boutros, P. Somasundar, S. Garrean, A. Saied, N.J. Espat // Surgical Oncology. – 2010. – Vol. 19 (1). – P. e22–e32.

8. *Kulaylat M.N., Gibbs J.F.* Thermoablation of colorectal liver metastasis // Journal of Surgical Oncology. – 2010. – Vol. 101 (8). – P. 699–705.

9. Small hepatocellular carcinoma in cirrhosis: randomized comparison of radio-frequency thermal ablation versus percutaneous ethanol injection / R.A. Lencioni, H.P. Allgaier, D. Cioni, M. Olschewski, P. Deibert, L. Crocetti, H. Frings, J. Laubenberger, I. Zuber, H.E. Blum, C. Bartolozzi // Radiology. – 2003. – Vol. 228 (1). – P. 235–240.

10. *Razafindratsira T., Isambert M., Evrard S.* Complications of intraoperative radiofrequency ablation of liver metastases // HPB (Oxford). – 2011. – Vol. 13 (1). – P. 15–23.

11. Микроволновая абляция в комбинированном лечении первичных опухолей и метастазов печени / М.М. Трандофилов, М.Н. Рудакова, К.Ю. Рябов, О.Ф. Шершнев, А.В. Прохоров // Анналы хирургической гепатологии. – 2015. – Т. 20 (4). – С. 34–39. – DOI: 10.16931/1995-5464.2015434-39.

12. *Балахнин П.В., Шмелев А.С., Шачинов Е.Г.* Чрескожная энергетическая абляция опухолей: принципы, технологии, результаты // Практическая онкология. – 2016. – Т. 17, № 3. – С. 129–153.

13. Principles of and advances in percutaneous ablation / M. Ahmed, C.L. Brace, F.T. Lee Jr, S.N. Goldberg // Radiology. – 2011. – Vol. 258, N 2. – P. 351–369.

14. Радиочастотная абляция как вспомогательный и окончательный метод лечения метастатического поражения печени у больных колоректальным раком / Э.Э. Топузов, М.А. Бобраков, В.К. Балашов, Е.И. Дрогомирецкая, Е.А. Ерохина, О.Н. Кислицина, А.Н. Петряшов, А.Н. Круглов, Р.Э. Топузов, Е.В. Напольская // Вестник Северо-Западного государственного медицинского университета им. И.И. Мечникова. – 2017. – Т. 9, № 1. – С. 7–14.

15. Радиочастотная катетерная абляция хронической формы фибрилляции предсердий методом изоляции легочных вен и анатомической модификации субстрата аритмии / А.В. Ардашев, Е.Г. Желяков, Е.А. Долгушина, М.С. Рыбаченко, Д.А. Мангутов, А.В. Конев, С.В. Волошко, О.Ю. Врублевский, М.В. Крючко, Э.Н. Ливенцева // Кардиология. – 2008. – № 12. – С. 41–48.

16. История развития радиочастотной абляции в травматологии и ортопедии / М.А. Гвоздев, М.В. Рябинин, А.С. Сапрыкин, Н.Н. Корнилов // Современные проблемы науки и образования. – 2021. – № 1. – URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=30460 (дата обращения: 30.08.2023).

17. *Тихонов В.Н.* Мини-свиньи – надежда человечества // Химия и жизнь – XXI век. – 2011. – № 9. – С. 32–36.

18. *Винская Е.К., Белавская С.В., Лисицына Л.И.* Лазерный контроль степени деструкции биологической ткани // Наука. Технологии. Инновации: 16 Всероссийская научная конференция молодых ученых, Новосибирск, 5–8 дек. 2022 г.: в 11 ч. – Новосибирск, 2022. – Ч. 6. – С. 119–123.

19. Абляция костной ткани, выполненная путем воздействия электромагнитным излучением высокочастотного диапазона / Л.И. Лисицына, С.В. Белавская, А.Н. Кузьмин, Е.К. Винская // Современные проблемы телекоммуникаций: материалы Российской научно-технической конференции, Новосибирск, 20–21 апр. 2022 г. – Новосибирск, 2022. – С. 648–652.

20. Comparative analysis of soft biological tissue ablation characteristics obtained by electromagnetic radiation of HF and UHF ranges / S.V. Belavskaya, L.I. Lisitsyna, A.N. Kuzmin, E.K. Vinskaya // IEEE 23 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM): proceedings, Erlagol, 30 June – 4 July 2022. – IEEE, 2022. – P. 510–513.

21. *Lisitsyna L.I., Belavskaya S.V., Blokhin A.A.* Utilization of high frequency electrical signal for biological tissue ablation // Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2021): proceedings, Novosibirsk, 19–21 Nov. 2021. – Novosibirsk, 2021. – P. 72–75.

22. Высокочастотная электромагнитная система для деструкции биологических тканей / С.В. Белавская, Л.И. Лисицына, А.Н. Кузьмин, Е.К. Винская, Л.Г. Навроцкий, В.П. Разинкин, А.А. Блохин // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 1 (89). – С. 55–80. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-55-80.

23. Лазерное или радиоволновое удаление новообразований / Центр лазерной медицины «Лазмед клиника». – URL: https://lasmed.ru/posts/745/ (дата обращения: 30.08.2023).

Белавская Светлана Витальевна, кандидат технических наук, доцент кафедры электронных приборов Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – исследование биофизических процессов, измерительная техника. Имеет более 200 публикаций, включая 18 авторских патентов РФ. E-mail: Svetlana.belana@yandex.ru

Лисицына Лилия Ивановна, доктор технических наук, профессор кафедры электронных приборов Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – разработка диагностических и терапевтических устройств, исследование биофизических процессов. Имеет более 500 научных публикаций, включая 40 авторских свидетельств и патентов РФ. E-mail: lisitcinali@gmail.com

Разинкин Владимир Павлович, доктор технических наук, профессор Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – широкополосное СВЧ-устройство высокого уровня мощности. Имеет более 160 научных работ, включая 36 патентов РФ на изобретение. E-mail: Razinkin@corp.nstu.ru

Винская Екатерина Константиновна, студент 4-го курса физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета. Занимается научными разработками в области разработки устройства по абляции биологических тканей. Имеет 4 научные публикации. E-mail: katerinavns@gmail.com

Хрусталёв Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – широкополосное СВЧ-устройство высокого уровня мощности. Имеет более 180 научных работ, включая 43 патентов РФ на изобретение. E-mail: VA_Khrustalev@ngs.ru

Кузьмин Антон Николаевич, магистр техники и технологии, инженер I кат. НПП «ВЕРСЕТ». Основное направление научных исследований – разработка медицинских устройств, исследование биофизических процессов. Имеет более 40 научных публикаций, включая один патент РФ. E-mail: anton@kuz-min.ru

Марков Артём Владимирович, старший преподаватель кафедры электронных приборов НГТУ, директор инжиниринговой компании «332LAB», ответственный исполнитель более 15 НИОКР, автор 26 научных публикаций.

Belavskaya Svetlana V., PhD (Eng.), associate professor at the Department of Electronic Devices in Novosibirsk State Technical University. The main fieeld of her scientific research is the study of biophysical processes and measuring equipment. She has more than 200 publications, including 18 copyright patents of the Russian Federation. E-mail: BelavskayaSV@gmail.com

Lisitsyna Liliya I., D. Sc. (Eng.), professor at the Department of Electronic Devices in Novosibirsk State Technical University. The main field of her scientific research is the development of diagnostic devices and the study of biophysical processes. She has more than 500 scientific publications, including 40 copyright certificates and patents of the Russian Federation. E-mail: lisitcinali@ gmail.com

Razinkin Vladimir P., D. Sc. (Eng.), associate professor in Novosibirsk State Technical University. The main field of his scientific research is a wide range microwave device of a high power level. He has more than 160 scientific publications, including 36 patents of the Russian Federation. E-mail: Razinkin@corp.nstu.ru

Vinskaya Ekaterina K., a 4th year student at the Faculty of Physics and Technology of Novosibirsk State Technical University. She has been engaged in scientific research for 2 years in the field of developing a device for ablation of biological tissues. She has 3 scientific publications. E-mail: katerinavns@gmail.com

Khrustalev Vladimir A., D.Sc. (Eng.), associate professor in Novosibirsk State Technical University. The main field of his scientific research is a wide range microwave device of a high power level He has more than 180 scientific publications, including 43 patents of the Russian Federation. E-mail: VA_Khrustalev@ngs.ru

Kuzmin Anton N. Master of Engineering and Technology, the Ist cathegory engineer of “VERSET”, LLC. The main field of his scientific research is the development of medical devices and study of biophysical processes. He has more than 40 scientific publications, including 1 patent of the Russian Federation. E-mail: anton@kuz-min.ru

Markov Artyom V., senior lecturer at the Department of Electronic Devices in Novosibirsk State Technical University, Director of the engineering company "332LAB", a responsible performer of more than 15 R&D projects. He is the author of 26 scientific publications. E-mail:avm@332lab.ru.

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-105-120

An electromagnetic system for the destruction of biological tissues at a frequency of 27.12 MHz *

S.V. BELAVSKAYA [a], L.I. LISITSYNA [b], V.P. RAZINKIN [c], E.K. VINSKAYA [d], V.A. KHRUSTALEV [e], A.N. KUZMIN [f], A.V. MARKOV [g]

Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] *Svetlana.belana@yandex.ru* [b] *lisitcinali@gmail.com* [c] *razinkin_vp@mail.ru*
[d] *katerinavns@gmail.com* [e] *va_khrustalev@ngs.ru* [f] *anton@kuz-min.ru*
[g] *markovav@corp.nstu.ru*

Abstract

The results of a study of the destruction of biological tissues by high-frequency electromagnetic radiation at an allowed frequency of 27.12 MHz are presented in comparison with destruction also at an allowed frequency of 13.56 MHz with the same power of the acting radiation of 30 W. Today, all known devices for high-frequency electromagnetic destruction at a frequency of 27.12 MHz are used for superficial shallow operations (removal of papillomas, moles, etc.). The development of a high-frequency electromagnetic system for the destruction of deep, dense tissues (bone, cartilage), as well as malignant neoplasms at the indicated frequency, is the most urgent task of our time. To conduct research at the indicated frequency, an experimental setup was developed and implemented on a modern element base, a distinctive feature of which is ensuring stable and reliable operation of the used transistor power amplifiers while maintaining their performance in a wide range of load changes (from idle to short circuit). This feature is implemented through the use of a two-channel bridge amplifying path. To test the operability of the installation, a multimeter with a thermal imager function and an immitance meter were used. The form of the output signal of the installation is a sinusoid, the second harmonic is weakened in relation to the main one by 60 dB. The studies were carried out in vitro on biopsies of muscle, bone tissues and liver of cattle, as well as on pig skin. It is shown that cuts of a biological tissue made at a frequency of 27.12 MHz have deep coagulation, and at a frequency of 13.56 MHz, carbonization of muscle tissue is already observed at the site of coagulation;the destruction of a bone tissue and liver at a frequency of 27.12 MHz is more pronounced, at a frequency of 13.56 MHz, elements of carbonization appear in the area of destruction. The exposure to high-frequency radiation at a frequency of 27.12 MHz occurs with a smaler effect on surrounding tissues than at a frequency of 13.56 MHz, Punctures of muscle tissue and liver performed at various frequencies practically do not differ; the temperature in the electric discharge region, which occurs at a frequency of 27.12 MHz at a radiation power of 30 W, is above 150 ° C (at a frequency of 13.56 MHz the temperature is 126 ° C).However, the temperature in the discharge region at a frequency of 27.12 MHz can be reduced to the same temperature as at a frequency of 13.56 MHz by reducing the power of electromagnetic radiation by a factor of 1.5.

Keywords: biological tissue, destruction, discharge, high-frequency, ablation, 27.12 MHz, coagulation, carbonization, temperature, second harmonic

REFERENCES

1. Moskvicheva L.I., Sidorov D.V., Lozhkin M.V., Petrov L.O., Zabelin M.V. Sovremennye metody ablyatsii zlokachestvennykh novoobrazovanii pecheni [Modern methods of ablation of malignant tumors of the liver]. *Issledovaniya i praktika v meditsine = Research'n Practical Medicine Journal*, 2018, vol. 5, no. 4, pp. 58–71.

* *Received 13 February 2023.*

2. Sidorov D.V., Grishin N.A., Lozhkin M.V., Vishnevskiy V.A., Petrov L.O. Novyi metod mikrovolnovoi ablyatsii zlokachestvennykh novoobrazovanii pecheni [A new method of microwave ablation of malignanthepatic tumors]. *Onkokhirurgiya = Oncosurgery*, 2012, vol. 4, no. 1, p. 50.

3. Sidorov D.V., Stepanov S.O., Grishin N.A., Lozhkin M.V., Petrov L.O., Mainovska O.A. Mikrovolnovaya ablyatsiya pri lechenii zlokachestvennykh novoobrazovanii pecheni [Microwave ablation for the treatment of malignant liver tumors]. *Onkologiya. Zhurnal im. P.A. Gertsena = P.A. Herzen Journal of Oncology*, 2013, no. 2, pp. 27–31.

4. Zhao J., Li Q., Muktiali M., Ren B., Hu Y., Li D., Li Z., Li D., Xie Y., Tao M., Liang R. Effect of microwave ablation treatment of hepatic malignancies on serum cytokine levels. *BMC Cancer*, 2020, vol. 20, p. 812.

5. Petrenko N.N., Barsukova Ye.O., Polischuk L.O., Fisenko Ye.P., Shatveryan G.A., Skipenko O.G. Rezul'taty radiochastotnoi ablyatsii pri lechenii kolorektal'nykh metastazov v pecheni [Results of radio-frequency ablation of colorectal cancer metastases in the liver]. *Rossiiskii zhurnal gastroenterologii, gepatologii, koloproktologii = Russian Journal of Gastroenterology, Hepatology, Coloproctology*, 2007, vol. 17, no. 3, pp. 84–89.

6. Fedorov V.D., Vishnevsky V.A., Kubyshkin V.A., et al. Ispol'zovanie apparata radiochastotnoi ablyatsii pri rezektsii pecheni [The use of radiofrequency ablation apparatus for liver resection]. *Khirurgiya. Zhurnal im. N.I. Pirogova = Pirogov Russian Journal of Surgery*, 2004, no. 5, pp. 21–25.

7. Boutros C., Somasundar P., Garrean S., Saied A., Espat N.J. Microwave coagulation therapy for hepatic tumors: review of the literature and critical analysis. *Surgical Oncology*, 2010, vol. 19 (1), pp. e22–e32.

8. Kulaylat M.N., Gibbs J.F. Thermoablation of colorectal liver metastasis. *Journal of Surgical Oncology*, 2010, vol. 101 (8), pp. 699–705.

9. Lencioni R.A., Allgaier H.P., Cioni D., Olschewski M., Deibert P., Crocetti L., Frings H., Laubenberger J., Zuber I., Blum H.E., Bartolozzi C. Small hepatocellular carcinoma in cirrhosis: randomized comparison of radio-frequency thermal ablation versus percutaneous ethanol injection. *Radiology*, 2003, vol. 228 (1), pp. 235–240.

10. Razafindratsira T., Isambert M., Evrard S. Complications of intraoperative radiofrequency ablation of liver metastases. *HPB (Oxford)*, 2011, vol. 13 (1), pp. 15–23.

11. Trandofilov M.M., Rudakova M.N., Ryabov K.Yu., Shershnev O.F., Prokhorov A.V. Mikrovolnovaya ablyatsiya v kombinirovannom lechenii pervichnykh opukholei i metastazov pecheni [Microwave ablation in combined treatment of primary and metastatic liver tumors]. *Annaly khirurgicheskoi gepatologii = Annals of HPB Surgery*, 2015, vol. 20 (4), pp. 34–39. DOI: 10.16931/1995-5464.2015434-39.

12. Balakhnin P.V., Shmelev A.S., Shachinov E.G. Chreskozhnaya energeticheskaya ablyatsiya opukholei: printsipy, tekhnologii, rezul'taty [Percutaneous energy ablation of tumors: principles, technologies, results]. *Prakticheskaya onkologiya = Practical Oncology*, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 129–153.

13. Ahmed M., Brace C.L., Lee F.T. Jr, Goldberg S.N. Principles of and advances in percutaneous ablation. *Radiology*, 2011, vol. 258, no. 2, pp. 351–369.

14. Topuzov E.E., Bobrakov M.A., Balashov V.K., Drogomiretskaya E.I., Erokhina E.A., Kislitsina O.N., Petryashov A.N., Kruglov A.N., Topuzov R.E., Napolskaya E.V. Radiochastotnaya ablyatsiya kak vspomogatel'nyi i okonchatel'nyi metod lecheniya metastaticheskogo porazheniya pecheni u bol'nykh kolorektal'nym rakom [Radiofrequency ablation as an auxiliary and final method of treatment of metastatic liver damage in patients with colorectal cancer]. *Vestnik Severo-Zapadnogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta im. I.I. Mechnikova = Herald of the Northwestern State Medical University named after I.I. Mechnikov*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 7–14.

15. Ardashev A.V., Zhelyakov E.G., Dolgushina E.A., Rybatchenko M.S., Mangutov D.A., Konev A.V., Voloshko S.V., Vrublevsky O.Yu., Kryuchko M.V., Liventseva E.N. Radiochastotnaya kateternaya ablyatsiya khronicheskoi formy fibrillyatsii predserdii metodom izolyatsii legochnykh ven i anatomicheskoi modifikatsii substrata aritmii [Radiofrequency ablation of chronic atrial fibrillation by combined isolation of pulmonary veins and anatomical modification of substrate of arrhythmia]. *Kardiologiya = Cardiology*, 2008, no. 12, pp. 41–48.

16. Gvozdev M.A., Ryabinin M.V., Saprykin A.S., Kornilov N.N. Istoriya razvitiya radiochastotnoi ablyatsii v travmatologii i ortopedii [History of development of radiofrequency ablation in traumatology and orthopedics]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*, 2021, no. 1. Available at: https://science-education.ru/ru/article/view?id=30460 (accessed 30.08.2023).

17. Tikhonov V.N. Mini-svin'i – nadezhda chelovechestva [Mini-pigs – the hope of mankind]. *Khimiya i zhizn' – XXI vek = Chemistry and Life – 21st Century*, 2011, no. 9, pp. 32–36.

18. Vinskaya E.K., Belavskaya S.V., Lisitsyna L.I. [Laser control of destruction degree of biological tissue]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii* [Science. Technologies. Innovations]. 16 All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, Novosibirsk, 5–8 Dec. of 2022. In 11 pt. Pt. 6, pp. 119–123. (In Russian).

19. Lisitsyna L.I., Belavskaya S.V., Kuzmin A.N., Vinskaya E.K. [Ablation of bone tissue performed by exposure to high-frequency electromagnetic radiation]. *Sovremennye problemy telekommunikatsii* [Modern problems of telecommunications]. Materials of the Russian Scientific and Technical conference, Novosibirsk, 20–21 April 2022, pp. 648–652. (In Russian).

20. Belavskaya S.V., Lisitsyna L.I., Kuzmin A.N., Vinskaya E.K. Comparative analysis of soft biological tissue ablation characteristics obtained by electromagnetic radiation of HF and UHF ranges. *IEEE 23 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*: proceedings, Erlagol, 30 June – 4 July 2022. IEEE, 2022, pp. 510–513.

21. Lisitsyna L.I., Belavskaya S.V., Blokhin A.A. Utilization of high frequency electrical signal for biological tissue ablation. *Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2021)*: proceedings, Novosibirsk, 19–21 Nov. 2021, pp. 72–75.

22. Belavskaya S.S., Lisitsyna L.I., Kuzmin A.N., Vinskaya E.K., Navrotsky L.D., Razinkin V.P., Blokhin A.A. Vysokochastotnaya elektromagnitnaya sistema dlya destruktsii biologicheskikh tkanei [A high-frequency electromagnetic system for biological tissues destruction]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 1 (89), pp. 55–80. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-55-80.

23. Lasmed Clinic. *Lazernoe ili radiovolnovoe udalenie novoobrazovanii* [Laser or radio wave removal of neoplasms]. (In Russian). Available at: https://lasmed.ru/posts/745/ (accessed 30.08.2023).

Для цитирования:

Электромагнитная система для деструкции биологических тканей на частоте 27,12 МГц / С.В. Белавская, Л.И. Лисицына, В.П. Разинкин, Е.К. Винская, В.А. Хрусталёв, А.Н. Кузьмин, А.В. Марков // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 3 (91). – С. 105–120. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-105-120.

For citation:

Belavskaya S.V., Lisitsyna L.I., Razinkin V.P., Vinskaya E.K., Khrustalev V.A., Kuzmin A.N., Markov A.V. Elektromagnitnaya sistema dlya destruktsii biologicheskikh tkanei na chastote 27,12 MGts [An electromagnetic system for the destruction of biological tissues at a frequency of 27.12 MHz]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 3 (91), pp. 105–120. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-105-120.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 91, № 3, 2023, с. 121–140

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 91, No. 3, 2023, pp. 121–140

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

УДК 621.38; 004.9

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-121-140

Интерполяция при микросканировании двухслойных матричных фотопреимников*

В.Л. ЖБАНОВА[a], И.В. ЯКИМЕНКО[b]

214013, г. Смоленск, Энергетический пр., 1, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт"»

[a] *vera-zhbanova@yandex.ru* [b] *jakigor@rambler.ru*

В работе представлен метод микросканирования двухслойных шаблонов матричных фотоприемников на основе кремния. Разработанные системы регистрируют видимый и инфракрасный спектры. Предложены различные методы микросканирования с разработанными мультиспектральными матричными фотоприемниками. В каждой ячейке регистрируется два цвета, что упрощает процесс интерполирования, а с технологией микросканирования можно исключить интерполяцию. Для полученных субпикселей алгоритм интерполяции сокращается. При этом следует учитывать направление сдвига матрицы, выполняя микросканирование. Для шаблонов с шахматным расположением ячеек выбор направления не так критичен, как для псевдорандомного или вертикального/горизонтального расположения.

При микросканировании следует учитывать направление сдвига матрицы. Для шаблонов с шахматным расположением ячеек выбор направления не так критичен, как для псевдорандомного или вертикального/горизонтального расположения. Так, к примеру, псевдорандомное расположение пригодно для регистрации изображений природы, где много мелких деталей различной формы, а вертикальное/горизонтальное – для сцен города и промышленных районов, где все имеет четкие вертикальные и горизонтальные линии. Сама идея микросканирования со сдвигом в половину пикселя позволяет заполнить «слепые» зоны матрицы (обвязка пикселя) с четырех сторон самого пикселя, что приводит к повышению цветового разрешения в 4 раза.

Для полученных субпикселей подходит линейный способ интерполяции или адаптивный. Также возможно пойти по более сложному пути и выбрать бикубическую, бигармоническую интерполяции. Однако такой подход противоречит самой концепции упрощения алгоритма обработки снимка, хотя и приводит к высококонтрастным цветовым разрешениям.

Подобные системы можно будет применять в съемке, где необходимо регистрировать точные детали местности или объекта, к примеру, в аэрофотосъемке, фотосъемке и фотограмметрии.

Ключевые слова: фотоприемник, микросканирование, мультиспектральный, интерполяция, субпиксель, двухслойный, сенсор, матрица, цифровой

---

* *Статья получена 25 мая 2023 г.*

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 21-79-00012.

ВВЕДЕНИЕ

Микросканирование применяется в аэрофотосъемке и космической фотосъемке [1–3]. Технология заключается в регистрации нескольких снимков при сдвиге матрицы, к примеру, пьезоэлементами. Микросканирование позволяет увеличить разрешение снимка и снизить шумы в изображении [4–6]. Для монохромных камер такой прием позволяет повысить четкость снимка, а для цветных приемников это необходимо. В последних система цветоделения состоит из шаблона цветных фильтров, накладываемых на ПЗС или КМОП матрицу. Такой шаблон позволяет регистрировать один из основных цветов (зеленый, синий, красный) только в одном пикселе, что вынуждает применять интерполирование для получения полноцветного изображения, а именно весовые показатели основных цветов в каждом пикселе. Интерполяция приводит к искажению исходной сцены изображения, что является критичным для аэрофотосъемки.

Поэтому было предложено применять двухслойные мультиспектральные матричные фотоприемники на основе кремния (рис. 1). Кремний поглощает разные длины волн в зависимости от толщины залегания потенциальной ямы. Такая способность позволяет создавать многослойные мультиспектральные системы цветоделения с возможностью регистрации УФ, видимого и ИК-диапазонов спектра. Существуют разработки трех- и пятислойных систем. Основной их недостаток – внутренние шумы. Большое количество слоев вынуждает делать сложные обвязки пикселя: столбцы буферизации, регистры хранения и передачи заряда и т. д. Ультрафиолетовая область требует работы над тонким поверхностным слоем кремния, что достаточно трудоемко и затратно. Поэтому было предложено остановиться на двухслойных системах. При этом основной упор был сделан на регистрацию инфракрасного спектра.

1. ДВУХСЛОЙНЫЕ СИСТЕМЫ ЦВЕТОДЕЛЕНИЯ

В настоящее время ведется активная научная работа по соединению видимого и инфракрасного спектра для получения мультиспектрального изображения различными способами [7–9].

Ранее подробно были рассмотрены усовершенствованные многослойные матричные фотоприемники [10, 11], приведены результаты исследования [12, 13]. Предложенные усовершенствованные системы цветоделения являются гибридом двух основных методов цветоделения – поверхностного и пространственного. Применение одного метода позволит исключить недостатки другого, такие как шумы, растекание заряда по соседним фотоэлементам, низкая оптическая передаточная функция. Двухслойные системы позволяют получать различные комбинации слоев в зависимости от требуемых характеристик изображения (рис. 1).

Авторами предлагается рассмотреть современные виды структур цветоделения в матричных системах регистрации изображения, работающих в видимом и инфракрасном диапазонах. В работе исследуются уникальные и передовые матричные фотоприемники многослойного типа. Последние разработки подобных матриц работают в видимом диапазоне и направлены главным образом на повышение разрешения снимка, хотя и имеют ряд недостатков

в области цветопередачи. Усовершенствование матричных фотоприемников является задачей области оптико-электронных систем и фотоники.

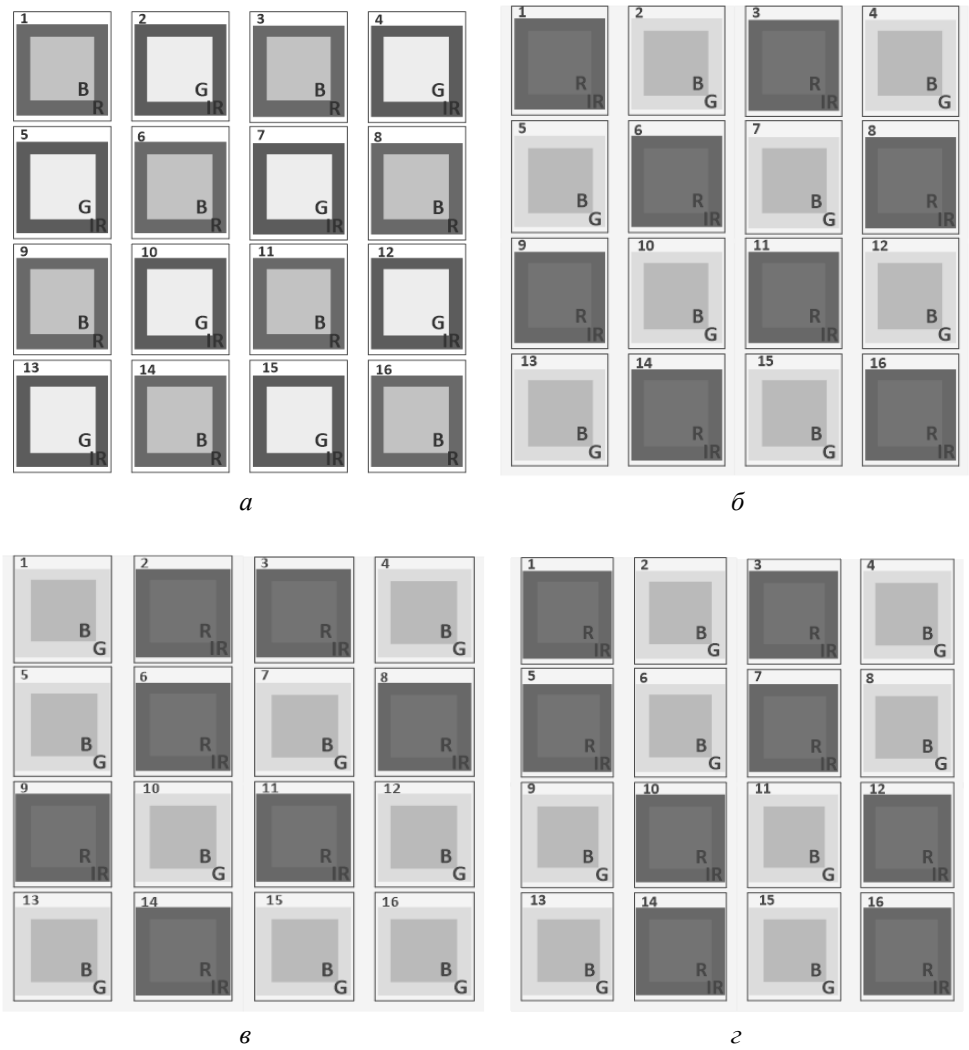


Рис. 1. Пример предложенных шаблонов двухслойных систем:

а – BR+GIr в шахматном порядке; *б* – RIr+BG в шахматном порядке; *в* – расположение BR+GIr псевдорандомное; *г* – расположение BR+GIr вертикальное

Fig. 1. An example of the proposed templates for two-layer systems:

a is BR+GIr in a staggered pattern; *b* is RIr+BG in a staggerd pattern; *c* is pseudo-random arrangement of BR+GIr; *d* is arrangement of BR+GIr

Предлагаемые двухслойные системы позволяют снизить интерполяционную нагрузку на снимок и максимально сохранить исходное изображение предметов. Шаблоны систем сделаны таким образом, чтобы каждый цвет (синий, зеленый, красный, инфракрасный) занимал половину чувствительной области матрицы. Также есть шаблоны, где большая доля чувствительной области приходится на зеленый или инфракрасный спектры.

2. МИКРОСКАНИРОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ СИСТЕМ

Микросканирование предложенных систем будет проходить по следующим этапам:

1) регистрация снимка в исходном положении матрицы;

2) регистрация снимка со сдвигом матрицы на один пиксель;

2′) регистрация снимка со сдвигом матрицы на 1/2 пикселя;

3) наложение полученных снимков – получение информации о каждом цвете в каждом пикселе матрицы;

3′) получение субпикселей;

4) расчет полноцветного изображения на основе субпикселей.

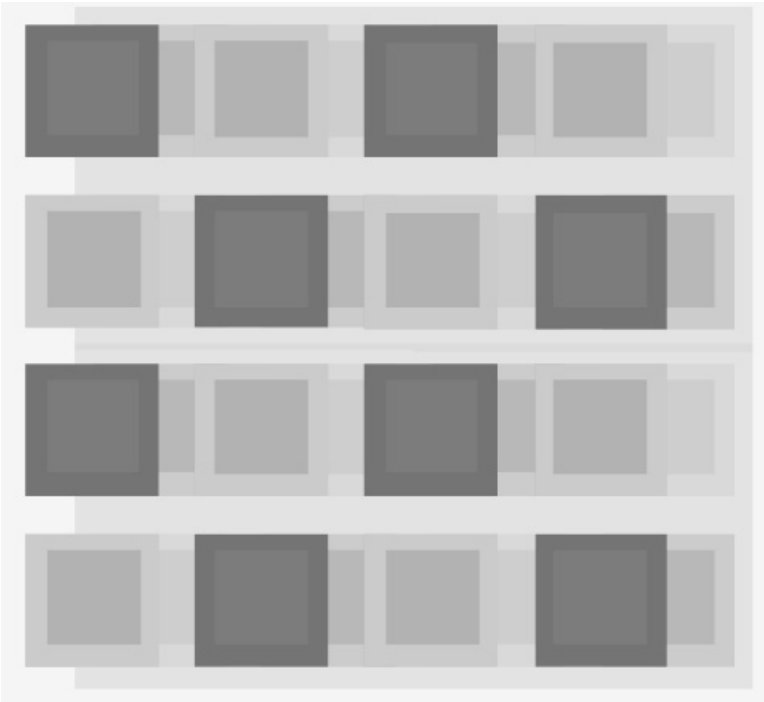
Субпиксели позволяют получить изображение с большим разрешением. При этом интерполяции цветов также не требуется, так как в каждом субпикселе уже имеется информация от основных пикселей, в отличие от стандартных матричных фотоприемников, где требуется несколько снимков для получения полноцветного изображения.

При микросканировании следует учитывать направление сдвига матрицы. Для шаблонов с шахматным расположением ячеек выбор направления не так критичен, как для псевдорандомного или вертикального расположения (рис. 1). Последние применяют для исключения муар-эффекта (алиасинга – ступенчатого эффекта на прямых линиях) и прочих артефактов при обработке изображения. Псевдорандомное расположение называется за счет того, что создается шаблон, состоящий из 12 или 24 пикселей, создающий видимость рандомного расположения ячеек шаблона. Так, к примеру, псевдорандомное расположение пригодно для регистрации изображений природы, где много мелких деталей различной формы, а вертикальное – для сцен города и промышленных районов, где всё имеет четкие вертикальные и горизонтальные линии.

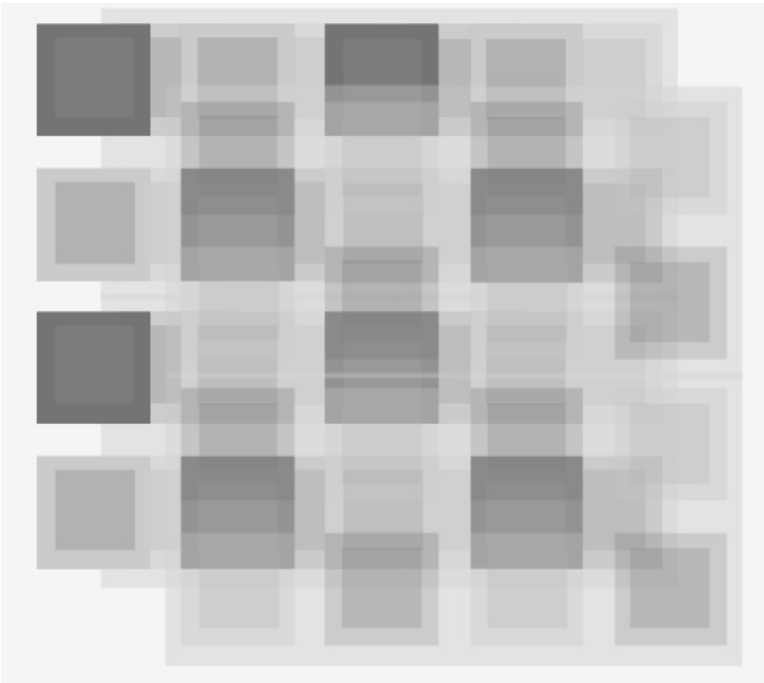
При микросканировании для псевдорандомного расположения шаблона по матрице необходимо выполнить несколько наложений снимков, чтобы покрыть каждый пиксель основными цветами. Подобные решения усложняют процесс микросканирования и последующей обработки снимка. Поэтому предпочтительной остается шахматная структура системы цветоделения. Так, для вертикального или горизонтального расположения достаточно линейного сдвига.

Разработаны различные алгоритмы получения изображений высокого разрешения по последовательности кадров. И это основной трудоемкий этап формирования изображения. При применении двухслойных матриц этот этап упрощается до линейного интерполирования или его полного отсутствия, когда происходит прямое присвоение значения цвета пикселю (рис. 2, *а*).

Наиболее оптимальным вариантом будет микросканирование с горизонтальным и вертикальным сдвигом (рис. 2, *б*). Такое размещение может позволить получить полноценные пиксели с известными основными цветами в каждом. Вспомогательные пиксели при сдвиге можно также учитывать как вспомогательные значения для основных цветов, присутствующих в основном пикселе. На рис. 3 представлены шаблоны полученных субпикселей. В случае только горизонтального или вертикального сдвига будут получены пиксели с горизонтальным или вертикальным порядком соответственно (рис. 3, *а*). При нескольких проходах матрицы по изображению будет получен псевдорандомный порядок (рис. 3, *б*), что поможет исключить алиасинг, но увеличит алгоритм процесса интерполирования.



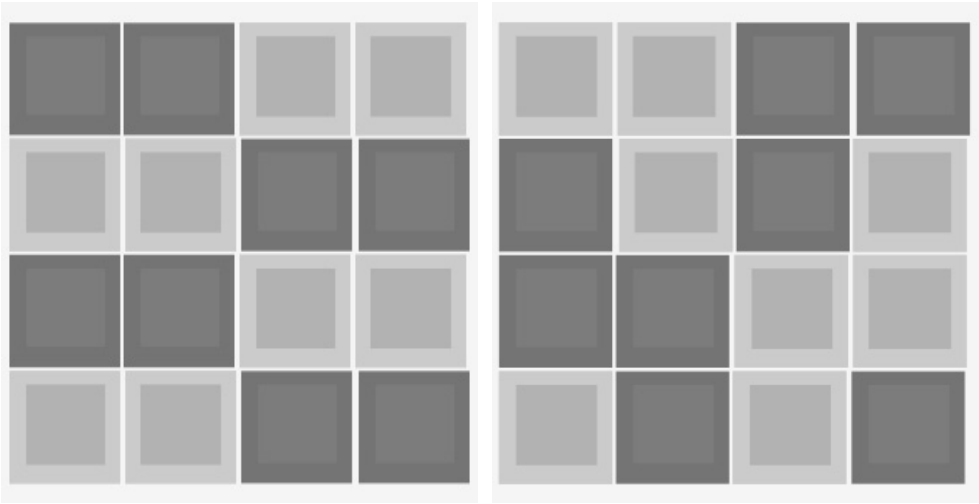
а



б

Рис. 2. Микросканирование со сдвигом 1/2 пикселя:
а – горизонтально; *б* – горизонтально и вертикально

Fig. 2. Microscanning with a 1/2 pixel shift:
a is horizontally; *b* is horizontally and vertically



а *б*

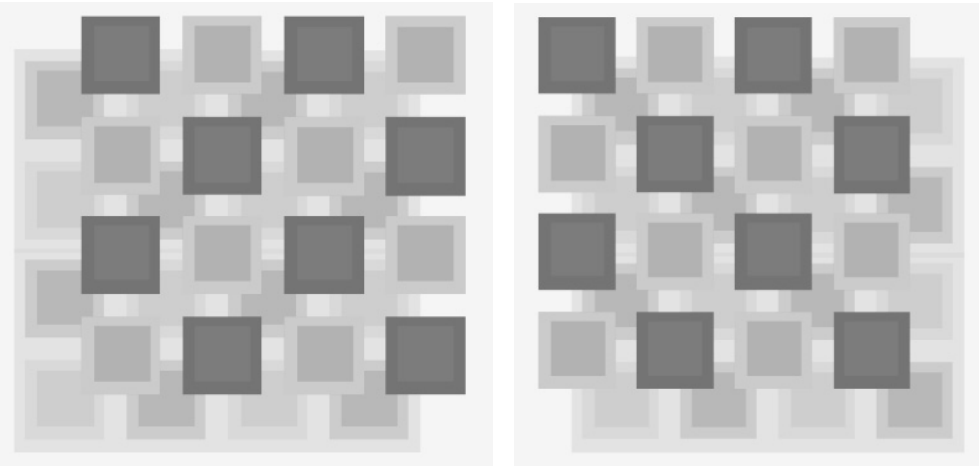
Рис. 3. Полученные субпиксели:

а – горизонтально; *б* – горизонтально и вертикально

Fig. 3. The obtained subpixels:

a is horizontally; *b* is horizontally and vertically

Наиболее интересного решения можно добиться получением субпикселей со сдвигом на 1/2 пикселя по диагонали (рис. 4), тогда необходимо либо выбрать доминантный пиксель, по которому будет регистрироваться цвет, либо применять интерполяцию для значений основных цветов для субпикселя с четырех соседних.



а *б*

Рис. 4. Микросканирование со сдвигом 1/2 пикселя диагонально:

а – сдвиг влево; *б* – сдвиг вправо

Fig. 4. Microscanning with a 1/2 pixel shift diagonally:

a is ashift to the left; *b* is a shift to the right

При диагональном сдвиге может усилиться алиасинг. Чтобы его избежать, можно применять три прохода матрицы: прямо, диагонально влево и диагонально вправо. После наложения этих трех снимков не будет необходимости в интерполировании цветов субпикселей.

Здесь также можно применить линейный или адаптивный способ интерполяции. Также возможно пойти по более сложному пути и выбрать бикубическую и бигармоническую интерполяции. Однако такой подход противоречит самой концепции упрощения алгоритма обработки снимка, хотя и приводит
к высококонтрастным цветовым разрешениям.

Из рассмотренных режимов микросканирования следует, что наиболее оптимальным является применение шаблона с двумя чувствительными слоями в каждой ячейке. В этом случае будут получены типовые выражения для расчета любых комбинаций двухслойных ячеек.

3. АДАПТИВНАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕННЫХ СУБПИКСЕЛЕЙ

Для основной части полученных субпиксельных систем применение интерполяции номинально и содержит простые линейные расчеты. Однако повторение пикселей в шаблоне может вызвать некоторые трудности с обработкой цвета. Поэтому следует рассмотреть некоторые случаи расположения полученных субпикселей.

Выбрана именно адаптивная интерполяция [14, 15], так как именно такая методика наиболее оптимальна и понятна для сравнения различных шаблонов. Метод Киммеля в данном случае нецелесообразен, так как в шаблонах сделан основной акцент на равное количество всех видов слоев, а не только на слои, чувствительные к зеленому излучению. А для такого адаптивного метода необходимо превалирование именно зеленого цвета.

Рассмотрим применение интерполяции к субпикселям, представленным на рис. 3, так как именно на алгоритм этого шаблона можно опираться при применении других двухслойных систем. Для удобства интерполирования шаблоны субпикселей пронумерованы и продублированы (рис. 5).

Для шаблона на рис. 5, *а* рассмотрим поиск недостающих цветов для ячеек 6, 7, 10 и 11. Для ячейки 6 определение красного и инфракрасного цвета будет произведено по следующим выражениям:

$$D_y(R_6) = \frac{R_2 - R_{10}}{2};$$

$$D_y(IR_6) = \frac{IR_2 - IR_{10}}{2};$$

$$E_2(R) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_6) + D^2(R_2)}};$$

$$E_{10}(R) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_6) + D^2(R_{10})}};$$

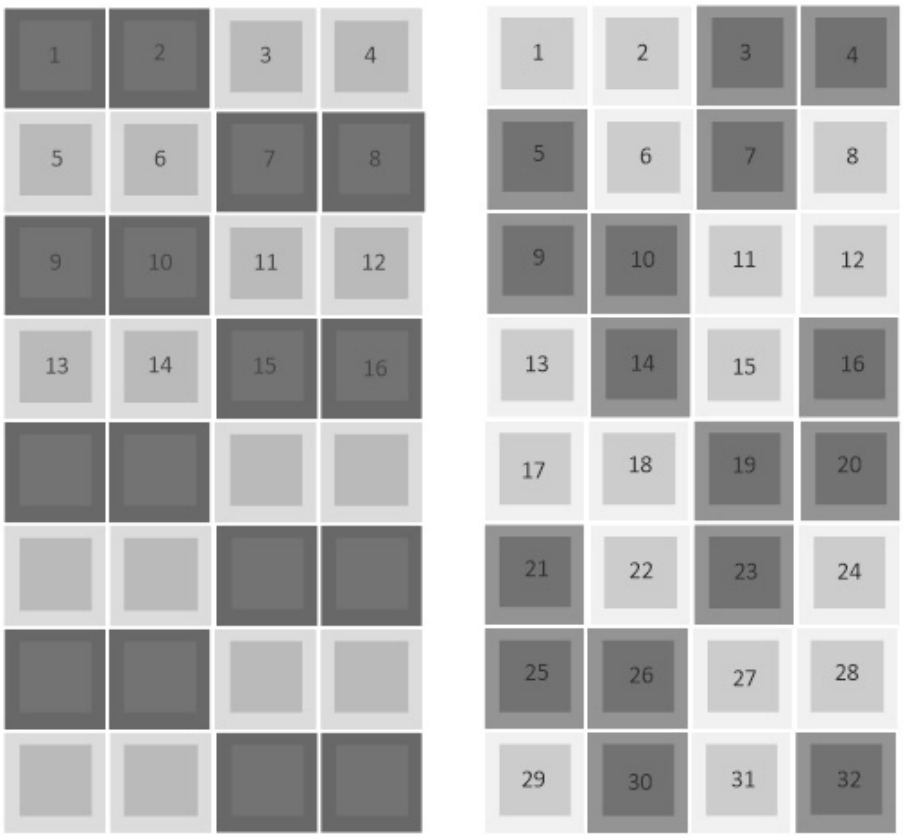
$$E_2(IR) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(IR_6) + D^2(IR_2)}};$$

$$E_{10}(IR) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(IR_6) + D^2(IR_{10})}}.$$

После того как нашли E, определим R и IR:

$$R_6 = \frac{R_2 E_2(R) + R_{10} E_{10}(R)}{E_2(R) + E_{10}(R)};$$

$$IR_6 = \frac{IR_2 E_2(IR) + IR_{10} E_{10}(IR)}{E_2(IR) + E_{10}(IR)}.$$



а *б*

Рис. 5. Полученные субпиксели:

а – горизонтально; *б* – горизонтально и вертикально

Fig. 5. The obtained subpixels:

a is horizontally; *b* is horizontally and vertically

Для ячейки 7 зеленый и синий цвет можно найти следующим образом:

$$D_y(G_7) = \frac{G_3 - G_{11}}{2};$$

$$D_y(B_7) = \frac{B_3 - B_{11}}{2};$$

$$E_3(G) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_7) + D^2(G_3)}};$$

$$E_{11}(G) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_7) + D^2(G_{11})}};$$

$$E_3(B) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_7) + D^2(B_3)}};$$

$$E_{11}(B) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_7) + D^2(B_{11})}}.$$

После того как нашли E, определим G и B:

$$G_7 = \frac{G_3 E_3(G) + G_{11} E_{11}(G)}{E_3(G) + E_{11}(G)};$$

$$B_7 = \frac{B_3 E_3(B) + B_{11} E_{11}(B)}{E_3(B) + E_{11}(B)}.$$

Для ячейки 10 определение зеленого и синего цвета производится следующим образом:

$$D_y(G_{10}) = \frac{G_6 - G_{14}}{2};$$

$$D_y(B_{10}) = \frac{B_6 - B_{14}}{2};$$

$$E_6(G) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{10}) + D^2(G_6)}};$$

$$E_{14}(G) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{10}) + D^2(G_{14})}};$$

$$E_6(B) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_{10}) + D^2(B_6)}};$$

$$E_{14}(B) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_{10}) + D^2(B_{14})}}.$$

После того как нашли E, определим G и B:

$$G_7 = \frac{G_3 E_3(G) + G_{11} E_{11}(G)}{E_3(G) + E_{11}(G)};$$

$$B_7 = \frac{B_3 E_3(B) + B_{11} E_{11}(B)}{E_3(B) + E_{11}(B)}.$$

Для ячейки 11 определение красного и инфракрасного цвета будет произведено по следующим выражениям:

$$D_y(R_{11}) = \frac{R_7 - R_{15}}{2};$$

$$D_y(IR_{11}) = \frac{IR_7 - IR_{15}}{2};$$

$$E_7(R) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{11}) + D^2(R_7)}};$$

$$E_{15}(R) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{11}) + D^2(R_{15})}};$$

$$E_7(IR) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(IR_{11}) + D^2(IR_7)}};$$

$$E_{15}(IR) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(IR_{11}) + D^2(IR_{15})}}.$$

После того как нашли E, определим R и IR:

$$R_{11} = \frac{R_7 E_7(R) + R_{15} E_{15}(R)}{E_7(R) + E_{15}(R)};$$

$$IR_{11} = \frac{IR_7 E_7(IR) + IR_{15} E_{15}(IR)}{E_7(IR) + E_{15}(IR)}.$$

Стоит отметить, что отличие расчета для горизонтального сдвига от вертикального будет заключаться только в том, что в первом случае будет расчет $D_y(N)$, во втором – $D_x(N)$.

Для шаблона на рис. 5, *б* применение только адаптивного метода невозможно для некоторых ячеек, поэтому необходимо будет прибегнуть к линейной интерполяции. Для ячейки 6 необходимо найти красный и инфракрасный цвет:

$$D_x(R_6) = \frac{R_5 - R_7}{2};$$

$$D_x(IR_6) = \frac{IR_5 - IR_7}{2};$$

$$E_5(R) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_6) + D^2(R_5)}};$$

$$E_7(R) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_6) + D^2(R_7)}};$$

$$E_5(IR) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(IR_6) + D^2(IR_5)}};$$

$$E_7(IR) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(IR_6) + D^2(IR_7)}}.$$

После того как нашли E, определим R и IR:

$$R_6 = \frac{R_5 E_5(R) + R_7 E_7(R)}{E_5(R) + E_7(R)};$$

$$IR_6 = \frac{IR_5 E_5(IR) + IR_7 E_7(IR)}{E_5(IR) + E_7(IR)}.$$

Для ячейки 7 необходимо найти зеленый и синий цвет следующим образом:

$$D_x(G_7) = \frac{G_6 - G_8}{2};$$

$$D_x(B_7) = \frac{B_6 - B_8}{2};$$

$$E_6(G) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_7) + D^2(G_6)}};$$

$$E_8(G) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_7) + D^2(G_8)}};$$

$$E_6(B) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_7) + D^2(B_6)}};$$

$$E_8(B) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_7) + D^2(B_8)}}.$$

После того как нашли E, определим G и B:

$$G_7 = \frac{G_6 E_6(G) + G_8 E_8(G)}{E_6(G) + E_8(G)};$$

$$B_7 = \frac{B_6 E_6(B) + B_8 E_8(B)}{E_6(B) + E_8(B)}.$$

Для ячейки 10 возможно воспользоваться линейной интерполяцией:

$$G_{10} = \frac{G_6 + G_{11}}{2};$$

$$B_{10} = \frac{B_6 + B_{11}}{2}.$$

Для ячейки 11 также необходимо применить линейную интерполяцию:

$$R_{11} = \frac{R_7 + R_{10}}{2};$$

$$IR_{11} = \frac{IR_7 + IR_{10}}{2}.$$

Для ячейки 14 поиск зеленого и синего цвета производится через выражения:

$$D_x(G_{14}) = \frac{G_{13} - G_{15}}{2};$$

$$D_x(B_{14}) = \frac{B_{13} - B_{15}}{2};$$

$$E_{13}(G) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{14}) + D^2(G_{13})}};$$

$$E_{15}(G) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{14}) + D^2(G_{15})}};$$

$$E_{13}(B) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_{14}) + D^2(B_{13})}};$$

$$E_{15}(B) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_{14}) + D^2(B_{15})}}.$$

После того как нашли E, определим G и B:

$$G_{14} = \frac{G_{13} E_{13}(G) + G_{15} E_{15}(G)}{E_{13}(G) + E_{15}(G)};$$

$$B_{14} = \frac{B_{13} E_{13}(B) + B_{15} E_{15}(B)}{E_{13}(B) + E_{15}(B)}.$$

Для ячейки 15 находим красный и инфракрасный цвет:

$$D_x(R_{15}) = \frac{R_{14} - R_{16}}{2};$$

$$D_x(IR_{15}) = \frac{IR_{14} - IR_{16}}{2};$$

$$E_{14}(R) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{15}) + D^2(R_{14})}};$$

$$E_{16}(R) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{15}) + D^2(R_{16})}};$$

$$E_{14}(IR) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(IR_{15}) + D^2(IR_{14})}};$$

$$E_{16}(IR) = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(IR_{15}) + D^2(IR_{16})}}.$$

После того как нашли E, определим R и IR:

$$R_{15} = \frac{R_{14}E_{14}(R) + R_{16}E_{16}(R)}{E_{14}(R) + E_{16}(R)};$$

$$IR_{15} = \frac{IR_{14}E_{14}(IR) + IR_{16}E_{16}(IR)}{E_{14}(IR) + E_{16}(IR)}.$$

Для ячейки 18 возможно применить линейную интерполяцию:

$$R_{18} = \frac{R_{14} + R_{19}}{2};$$

$$IR_{18} = \frac{IR_{14} + IR_{19}}{2}.$$

Для ячейки 19 также применима линейная интерполяция:

$$G_{19} = \frac{G_{15} + G_{18}}{2};$$

$$B_{19} = \frac{B_{15} + B_{18}}{2}.$$

Если сравнивать расчеты для полученных субпикселей с вычислениями для шаблонов, представленных в [16], то можно заметить простоту алгоритма интерполяции субпикселей. Такая однотипность сокращает необходимые объемы памяти для вычислений и время обработки снимка.

Для сравнения можно рассмотреть интерполяцию самого шаблона, на основе которого получены субпиксели (рис. 6).

В шаблоне для ячейки 6 следует определить цвета G и B. Эти цвета можно рассчитать через значения двух других. При интерполяции адаптивным методом необходимо определить производные цвета D и веса этих цветов E слоев:

$$D_x(G_6) = \frac{G_5 - G_7}{2};$$

$$D_y(G_6) = \frac{G_2 - G_{10}}{2};$$

$$D_x(B_6) = \frac{B_5 - B_7}{2};$$

$$D_y(B_6) = \frac{B_2 - B_{10}}{2};$$

$$E_5 = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_6) + D^2(G_5)}};$$

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_6) + D^2(G_2)}};$$

$$E_7 = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_6) + D^2(G_7)}};$$

$$E_{10} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_6) + D^2(G_{10})}}.$$

Аналогично для ячейки 6 можно определить E и с помощью синего цвета:

$$E_5 = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_6) + D^2(B_5)}};$$

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_6) + D^2(B_2)}};$$

$$E_7 = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_6) + D^2(B_7)}};$$

$$E_{10} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_6) + D^2(B_{10})}}.$$

Теперь следует определить G:

$$G_6 = \frac{G_5E_5 + G_2E_2 + G_7E_7 + G_{10}E_{10}}{E_5 + E_2 + E_7 + E_{10}}.$$

Для этой ячейки B следует определять таким же образом:

$$B_6 = \frac{B_5E_5 + B_2E_2 + B_7E_7 + B_{10}E_{10}}{E_5 + E_2 + E_7 + E_{10}}.$$

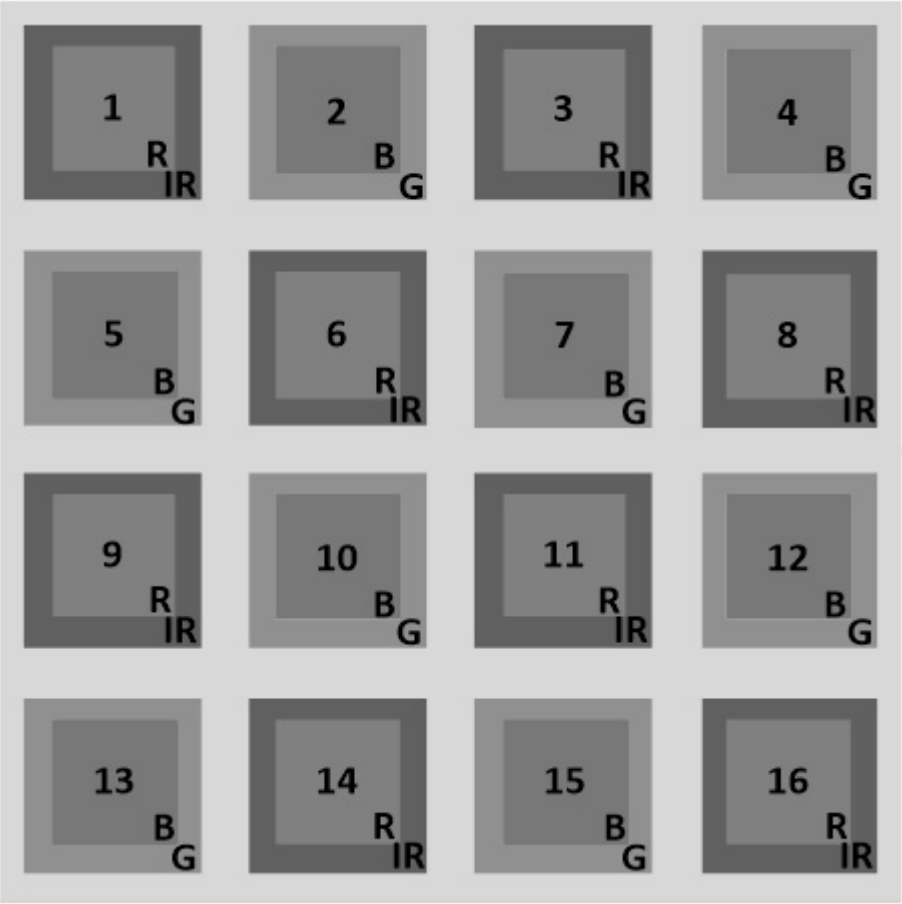


Рис. 6. Шаблон BG+RIr

Fig. 6. The BG+RIr pattern

Для ячейки 7 необходимо определить R и IR. Параметр R определяется следующим образом:

$$D_x(R_7) = \frac{R_6 - R_8}{2};$$

$$D_y(R_7) = \frac{R_3 - R_{11}}{2};$$

$$D_x(IR_7) = \frac{IR_6 - IR_8}{2};$$

$$D_y(IR_7) = \frac{IR_3 - IR_{11}}{2};$$

$$E_6 = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_7) + D^2(R_6)}};$$

$$E_3 = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_7) + D^2(R_3)}};$$

$$E_8 = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_7) + D^2(R_8)}};$$

$$E_{11} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_7) + D^2(R_{11})}}.$$

Параметр *IR* определяется таким же способом:

$$E_6 = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(IR_7) + D^2(IR_6)}};$$

$$E_3 = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(IR_7) + D^2(IR_3)}};$$

$$E_8 = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(IR_7) + D^2(IR_8)}};$$

$$E_{11} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(IR_7) + D^2(IR_{11})}}.$$

Теперь следует определить *R*:

$$R_7 = \frac{R_6E_6 + R_3E_3 + R_8E_8 + R_{11}E_{11}}{E_6 + E_3 + E_8 + E_{11}}.$$

Для этой ячейки *IR* следует определять таким же образом:

$$IR_7 = \frac{IR_6E_6 + IR_3E_3 + IR_8E_8 + IR_{11}E_{11}}{E_6 + E_3 + E_8 + E_{11}}.$$

Подобные алгоритмы также однотипны, но более объемны.

Далее можно продумать более сложные схемы, позволяющие повысить резкость изображений или определенных цветов. Однако, как показывает практика, чем чаще выбираются дальние пиксели для нахождения неопределенного цвета, тем более «смазанным» получается изображение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учеными разработаны различные алгоритмы получения изображений высокого разрешения по последовательности кадров. И это основной трудоемкий этап получения изображения. При применении двухслойных матриц этот этап упрощается до линейного интерполирования или его полного отсутствия, когда происходит прямое присвоение значения цвета пикселю.

Исключение может касаться субпикселей, полученных сдвигом на ½ пикселя по диагонали. Тогда необходимо либо выбрать доминантный пиксель, по которому будет регистрироваться цвет, либо применять интерполяцию для значений основных цветов для субпикселя с четырех соседних. Здесь также можно применить линейный способ интерполяции или адаптивный, также возможно пойти по более сложному пути и выбрать бикубическую и бигармоническую интерполяции. Однако такой подход противоречит самой концепции упрощения алгоритма обработки снимка, хотя и приводит к высококонтрастным цветовым разрешениям.

При микросканировании следует учитывать направление сдвига матрицы. Для шаблонов с шахматным расположением ячеек выбор направления не так критичен, как для псевдорандомного или вертикального/горизонтального расположения. Так, к примеру, псевдорандомное расположение пригодно для регистрации изображений природы, где много мелких деталей различной формы; а вертикальное/горизонтальное – для сцен города и промышленных районов, где всё имеет четкие вертикальные и горизонтальные линии. Сама идея микросканирования со сдвигом в половину пикселя позволяет заполнить «слепые» зоны матрицы (обвязка пикселя) с четырех сторон самого пикселя, что приводит к повышению цветового разрешения в 4 раза.

Для полученных субпикселей подходит линейный или адаптивный способ интерполяции. Также возможно пойти по более сложному пути и выбрать бикубическую и бигармоническую интерполяции. Однако такой подход противоречит самой концепции упрощения алгоритма обработки снимка, хотя и приводит к высококонтрастным цветовым разрешениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фотоприемные модули с режимом ВЗН для мониторинга земной поверхности в ИК-диапазоне / П.А. Кузнецов, И.С. Мощев, В.В. Сало, Н.Ф. Кощанцев // Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2, № 6. – С. 635–638.

2. *Соляков В.Н., Козлов К.В., Кузнецов П.А.* Компьютерная модель процесса регистрации точечных источников излучения многорядными ФПУ с режимом ВЗН // Прикладная физика. – 2014. – № 2. – С. 54–57.

3. *Шакенов А.К., Будеев Д.Е.* Фильтрация изображений малоразмерных объектов в системах с круговым микросканированием // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 4. – С. 120–126.

4. *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.* Некоторые пути совершенствования тепловизионных систем // Специальная техника. – 2004. – № 2. – С. 11–19.

5. Miniaturized high performance starring thermal imaging system / W.A. Cabanski, R. Breiter, K.-H. Mauk, W. Rode, J. Ziegler, L. Ennenga, U.M.S. Lipinski, T. Wehrhahn // Proceedings of SPIE. – 2000. – Vol. 4028. – P. 208–219.

6. *Wiltse J.M., Miller J.L.* Imagery improvements in staring infrared imagers by employing subpixel microscan // Optical Engineering. – 2005. – Vol. 44, iss. 5. – P. 056401. – DOI: 10.1117/1.1917312.

7. Online correction of the mutual miscalibration of multimodal VIS–IR sensors and 3D data on a UAV platform for surveillance applications / P. Siekański, S. Paśko, K. Malowany, M. Males // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11 (21). – P. 2469. – DOI: 10.3390/rs11212469.

8. *Stotko P., Weinmann M., Klein R.* Albedo estimation for real-time 3D reconstruction using RGB-D and IR data // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2019. – Vol. 150. – P. 213–225. – DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.01.018.

9. Monocular color-IR imaging system applicable for various light environments / Y. Nonaka, D. Yoshida, S. Kitamura, T. Yokota, M. Hasegawa, K. Ootsu // 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). – IEEE, 2018. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/ICCE.2018.8326238.

10. *Zhbanova V.L., Parvulyusov Yu.B., Solomatin V.A.* Multispectral matrix silicon photodetectors with the IR range registration // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1679. – P. 022039. – DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022039.

11. Патент на полезную модель № 212107 U1 Российская Федерация: № 2022108490: заявл. 30.03.2022: опубл. 06.07.2022, Бюл. № 19. Мультиспектральный матричный фотоприемник / Жбанова В.Л., Якименко И.В.

12. *Жбанова В.Л., Парвулюсов Ю.Б.* Исследование оптических явлений в мультиспектральном матричном фотоприемнике на основе кремния // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2022. – Т. 22, № 5. – С. 903–911. – DOI: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-903-911.

13. *Жбанова В.Л.* Функции распределения цвета в многослойных мультиспектральных матричных фотоприемниках при интерполировании // Оптический журнал. – 2022. – Т. 89, № 11. – С. 44–53. – DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-11-44-53.

14. *Гурьянова О.А., Филимонова Е.В.* Исследование муарообразования при репродуцировании информации с применением программных методов // Прикладная информатика. – 2019. – Т. 14, № 3 (81). – С. 113–128.

15. *Ramanath R., Snyder W., Bilbro G.* Demosaicking methods for Bayer color arrays // Journal of Electronic Imaging. – 2002. – Vol. 11 (3). – P. 306–315. – URL: https://home.cis.rit.edu/~cnspci/references/dip/demosaicking/ramanath2002.pdf (accessed: 31.08.2023).

16. *Жбанова В.Л., Якименко И.В.* Применение интерполирования к мультиспектральным матричным фотоприемникам // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон». – 2022. – № 32. – С. 528–537. – DOI: 10.20948/graphicon-2022-528-537.

Жбанова Вера Леонидовна, кандидат технических наук, доцент, филиал ФГБОУ ВО «НИУ “МЭИ”» в г. Смоленске. Основное направление научных исследований – оптико-электронные приборы и системы, цифровая обработка изображений, фотометрия. Имеет более 60 печатных работ. E-mail: vera-zhbanova@yandex.ru

Якименко Игорь Владимирович, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроники и микропроцессорной техники, филиал ФГБОУ ВО «НИУ “МЭИ”» в г. Смоленске. Основное направление научных исследований – цифровая обработка изображений, оптико-электронные системы. Имеет более 50 печатных работ. E-mail: Jakigor@rambler.ru

Zhbanova Vera L., Ph.D. The main field of her scientific research is optoelectronic devices and systems, digital image processing, and photometry. She has over 60 publications. E-mail: vera-zhbanova@yandex.ru.

Yakimenko Igor V., D.Sc. (Eng.), Head of the Department of Electronics and Microprocessor Technology, branch of FGBOU VO NRU MPEI in Smolensk. The main field of his scientific research is digital image processing and optoelectronic systems. He has over 50 publications. E-mail: Jakigor@rambler.ru.

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-121-140

Interpolation in microscaning two-layer matrix photoreceivers[*]

V.L. ZHBANOVA[a], *I.V. YAKIMENKO*[b]

The Branch of National Research University "Moscow Power Engineering Institute" in Smolensk, Energy driveway, Smolensk, 214013, Russian Federation

[a] *vera-zhbanova@yandex.ru* [b] *jakigor@rambler.ru*

Abstract

The paper presents a method for microscanning two-layer patterns of matrix photodetectors based on silicon. The developed systems register the visible and infrared spectra. Various methods of microscanning with the developed multispectral matrix photodetectors are proposed. Two colors are recorded in each cell, which simplifies the interpolation process, and using the microscanning technology, can eliminate it. For the obtained subpixels, the interpolation algorithm is reduced. In this case, the direction of a matrix shift should be taken into account when performing microscanning. For staggered cell patterns, the choice of direction is not as critical as for pseudo-random or vertical/horizontal arrangement.

When microscanning, the direction of matrix shift should be taken into account. For staggered cell patterns, the choice of direction is not as critical as for pseudo-random or vertical/horizontal arrangement. So, for example, a pseudo-random arrangement is suitable for recording images of nature, where there are many small details of various shapes; and vertical/horizontal arrangement is suitable for scenes of the city and industrial areas, where everything has clear vertical and horizontal lines. The very idea of microscanning with a shift of half a pixel makes it possible to fill the "blind" zones of the matrix - pixel binding - on four sides of the pixel itself, which leads to a 4-fold increase in color resolution.

For the obtained subpixels, a linear or adaptive interpolation method is suitable. It is also possible to take a more complicated path and choose bicubic, biharmonic interpolation. However, this approach contradicts the very concept of simplifying the image processing algorithm, although it leads to high-contrast color resolutions.

Such systems can be used in surveys where it is necessary to record the exact details of a terrain or object, for example, in aerial photography and photogrammetry.

Keywords: photodetector, microscanning, multispectral, interpolation, subpixel, two-layer, sensor, matrix, digital.

REFERENCES

1. Kuznetsov P.A., Moshchev I.S., Salo V.V., Koshantsev N.F. Fotopriemnye moduli s rezhimom VZN dlya monitoringa zemnoi poverkhnosti v IK-diapazone [Photodetecting TDI modules for Earth surface monitoring in IR range]. *Uspekhi prikladnoi fiziki = Advances in Applied Physics*, 2014, vol. 2, no. 6, pp. 635–638.

2. Solyakov V.N., Kozlov K.V., Kuznetsov P.A. Komp'yuternaya model' protsessa registratsii tochechnykh istochnikov izlucheniya mnogoryadnymi FPU s rezhimom VZN [Computer model of point target detection by FPA with time delay integration]. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*, 2014, no. 2, pp. 54–57.

3. Shakenov A.K., Budeyev D.E. Fil'tratsiya izobrazhenii malorazmernykh ob"ektov v sistemakh s krugovym mikroskanirovaniem [Filtering of images of small-sized objects in systems with circular microscaning]. *Avtometriya = Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 120–126. (In Russian).

4. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. Nekotorye puti sovershenstvovaniya teplovizionnykh sistem [Some ways of improving thermal imaging systems]. *Spetsial'naya tekhnika = Special Equipment*, 2004, no. 2, pp. 11–19.

[*] *Received 25 May 2023.*

The reported study was funded by RSF, project number 21-79-00012.

5. Cabanski W.A., Breiter R., Mauk K.-H., Rode W., Ziegler J., Ennenga L., Lipinski U.M.S., Wehrhahn T. Miniaturized high performance starring thermal imaging system. *Proceedings of SPIE*, 2000, vol. 4028, pp. 208–219.

6. Wiltse J.M., Miller J.L. Imagery improvements in staring infrared imagers by employing subpixel microscan. *Optical Engineering*, 2005, vol. 44, iss. 5, p. 056401. DOI: 10.1117/1.1917312.

7. Siekański P., Paśko S., Malowany K., Malesa M. Online correction of the mutual miscalibration of multimodal VIS–IR sensors and 3D data on a UAV platform for surveillance applications. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11 (21), p. 2469. DOI: 10.3390/rs11212469.

8. Stotko P., Weinmann M., Klein R. Albedo estimation for real-time 3D reconstruction using RGB-D and IR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, vol. 150, pp. 213–225. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.01.018.

9. Nonaka Y., Yoshida D., Kitamura S., Yokota T., Hasegawa M., Ootsu K. Monocular color-IR imaging system applicable for various light environments. *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. IEEE, 2018, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICCE.2018.8326238.

10. Zhbanova V.L., Parvulyusov Yu.B., Solomatin V.A. Multispectral matrix silicon photodetectors with the IR range registration. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1679, p. 022039. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022039.

11. Zhbanova V.L., Yakimenko I.V. *Mul'tispektral'nyi matrichnyi fotopriemnik* [Multispectral matrix photodetector]. Patent RF, no. 212107, 2022.

12. Zhbanova V.L., Parvulusov Yu.B. Issledovanie opticheskikh yavlenii v mul'tispektral'nom matrichnom fotopriemnike na osnove kremniya [Investigation of optical phenomena in multispectral matrix photodetector based on silicon]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki = Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 903–911. DOI: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-903-911.

13. Zhbanova V.L. Color distribution functions of multilayer multispectral matrix photodetectors after interpolation. *Journal of Optical Technology*, 2022, vol. 89, no. 11, pp. 670–676. DOI: 10.1364/JOT.89.000670. Translated from *Opticheskii zhurnal*, 2022, vol. 89, no. 11, pp. 44–53. 10.17586/1023-5086-2022-89-11-44-53.

14. Guryanova O., Filimonova E. Issledovanie muaroobrazovaniya pri reprodutsirovanii informatsii s primeneniem programmnykh metodov [Study of moire formation in the reproduction of information using software methods]. *Prikladnaya informatika = Journal of Applied Informatics*, 2019, vol. 14, no. 3 (81), pp. 113–128.

15. Ramanath R., Snyder W., Bilbro G. Demosaicking methods for Bayer color arrays. *Journal of Electronic Imaging*, 2002, vol. 11 (3), pp. 306–315. Available at: https://home.cis.rit.edu/~cnspci/references/dip/demosaicking/ramanath2002.pdf (accessed 31.08.2023).

16. Zhbanova V.L., Yakimenko I.V. Primenenie interpolirovaniya k mul'tispektral'nym matrichnym fotopriemnikam [Application of interpolation to multispectral array photodetectors]. *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii po komp'yuternoi grafike i zreniyu «Grafikon» = Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Vision "Graphicon"*, 2022, no. 32, pp. 528–537. DOI: 10.20948/graphicon-2022-528-537.

Для цитирования:

Жбанова В.Л., Якименко И.В. Интерполяция при микросканировании двухслойных матричных фотоприемников // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 3 (91). – С. 121–140. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-121-140.

For citation:

Zhbanova V.L., Yakimenko I.V Interpolyatsiya pri mikroskanirovanii dvukhsloinykh matrichnykh fotopriemnikov [Interpolation in microscaning two-layer matrix photoreceivers]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 3 (91), pp. 121–140. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-121-140.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 91, № 3, 2023, с. 141–151

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 91, No. 3, 2023, pp. 141–151

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

УДК 53.083

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-141-151

Способ обработки спектра излучения лазера на основе экспериментально записанной формы пропускания интерферометра Фабри – Перо*

К.Н. САВИНОВ[a], Н.Н. ГОЛОВИН[b], Л.Р. ДМИТРИЕВА[c], А.К. ДМИТРИЕВ[d], Д.М. КОТИНА[e]

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

[a] *k.n.savinov@yandex.ru* [b] *n.golovin@corp.nstu.ru* [c] *dmitrieva-leyla@mail.ru*
[d] *alexander_dmitriev@ngs.ru* [e] *kotinadasha03@yandex.ru*

В настоящее время для создания квантовых стандартов частоты широко используется явление когерентного пленения населенности (КПН), в котором при достижении определенной интенсивности и совпадении частотного интервала между спектральными компонентами с частотой сверхтонкого перехода в атоме (чаще всего в рубидии или цезии), наблюдается узкий резонанс в спектре поглощения, и пропускание ячейки с парами щелочного металла резко растет. Поскольку амплитуда КПН резонанса критически зависит от интенсивности и положения спектральных компонент излучения накачки, необходимо контролировать параметры этих компонент, записанных, как правило, в цифровом виде.

В настоящей работе описывается принципиально новый метод обработки зарегистрированного с помощью сканируемого интерферометра Фабри – Перо (ИФП) спектра излучения лазера, основанный на использовании в качестве эталонной спектральной компоненты экспериментально записанной формы пропускания сканируемого ИФП. В работе приведены примеры обработки экспериментально записанных спектров излучения диодного лазера с внешним резонатором при СВЧ-модуляции его тока инжекции. Погрешность обработки предложенным методом оказалась примерно на порядок меньше, чем при обработке широко известной формулой Эйри, описывающей пропускание ИФП. Это объясняется тем фактом, что формула Эйри справедлива для световых пучков, кривизна волнового фронта которых согласована с кривизной зеркал ИФП, что зачастую не выполняется в случае реального эксперимента.

Метод может использоваться для обработки спектров модулированного излучения различных типов лазеров, что является актуальной задачей при регистрации КПН резонансов и дальнейшем создании на их основе квантовых стандартов частоты.

Ключевые слова: диодный лазер, спектр излучения, обработка спектра, частотная модуляция, формула Эйри, КПН-резонанс, стандарт частоты, интерферометр Фабри – Перо

---

* *Статья получена 02 марта 2023 г.*

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FSUN-2023-0007.

ВВЕДЕНИЕ

Обработка спектров является важной задачей для многих областей науки, таких как физика, астрофизика и др. Одной из основных задач данного типа является обработка спектров излучения лазера, используемых для накачки резонансов когерентного пленения населенности (КПН) [1, 2]. Стандарты частоты на основе КПН-резонанса, возникающего при взаимодействии оптического излучения с атомами щелочных металлов, обладают хорошей кратковременной стабильностью и могут быть использованы в системах связи, геолокации и других приложениях [3]. Световые сдвиги КПН-резонанса, которые влияют на стабильность стандарта частоты, зависят от разности амплитуд спектральных компонент, дающих вклад в накачку резонанса [4]. Таким образом, для регистрации КПН-резонансов и снижения световых сдвигов необходимо получение информации об амплитудах и частотах спектральных компонент источника накачки [5, 6].

Также задача обработки спектров излучения находит применение при исследовании спектральных характеристик диодных лазеров при модуляции тока инжекции [7, 8].

В работах [9–11] обработка спектров осуществляется с помощью использования функций Лоренца. В [10] было показано, что спектр поглощения хорошо аппроксимируется с использованием данной функции, однако стоит заметить, что спектр был получен с помощью переноса оптической частоты в радиодиапазон с последующим использованием преобразования Фурье. В [9] использовалась совокупность лоренцевских линий для аппроксимации спектров, записанных при помощи ИФП. При использовании зеркал с кривизной, близкой к форме волнового фронта излучения, возможно существенное увеличение точности записываемых спектров. С другой стороны, при помощи обработки совокупностью лоренцевских линий получается симметричный результат, в то время как экспериментальные данные обладают значительной асимметрией, что приводит к неточности в определении положения центральной части.

В [11] был предложен метод выделения пиков лоренцевской формы в спектре путем его интерполяции целочисленными сдвигами. Был выполнен расчет коэффициентов угловой функции, а также вычислены амплитуды составляющих компонент для тестовых сигналов. Данный метод обеспечивает хорошее качество восстановления исходного сигнала (погрешность порядка 0,1 %) в отсутствие шума, однако при наличии 5 %-го случайного шума, характерного для прикладных задач, границы применимости метода становятся значительно меньше. Таким образом, при работе с реальными сигналами необходимы дополнительные меры для обеспечения устойчивости вычислений.

В работах [12, 13] для ИФП предлагается использование формулы Эйри. Для ИФП с базой 2…5 мкм [12] наблюдается существенное расхождение экспериментального и теоретического сигналов вблизи центра спектральной компоненты. В [13] использование данной формулы предлагается для спектров после ИФП со сферическими зеркалами. Однако стоит заметить, что для осуществления корректной записи отдельных компонент спектра накладывается ряд дополнительных условий, что приводит к значительному усложнению обработки экспериментальных данных.

В [14] был предложен метод обработки спектра поглощения молекулы $AgNO_3$ с использованием гауссовой и лоренцевой линий. При этом результаты обработки с использованием гауссиана оказываются лучше во всех экспериментах. Гауссова функция также была использована в [15] для обработки спектров, записанных в широком диапазоне частот с помощью спектрофотометра СФ-56. Помимо этого, в указанной работе обработка спектров происходила и с использованием дифракционной функций. При этом результаты аппроксимации гауссовой функцией лучше, так как дифракционная функция обладает побочными максимумами, вследствие чего является непригодной для обработки сложных спектров, состоящих из нескольких компонент.

В настоящей работе предлагается метод обработки спектров излучения лазера, позволяющий более точно определить амплитуды и положения центральной и боковых спектральных составляющих.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В работе используется диодный лазер с внешним резонатором, представленным дифракционной решеткой. Подробное описание схемы лазера представлено в работе [7]. Схема экспериментальной установке приведена на рис. 1.

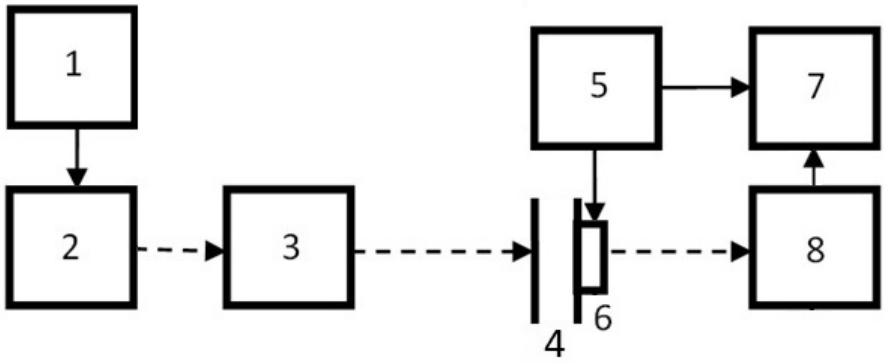


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – генератор сверхвысокочастотных сигналов; *2* – диодный лазер; *3* – оптический изолятор; *4* – интерферометр Фабри – Перо; *5* – генератор пилообразного напряжения; *6* – пьезокерамический преобразователь; *7* – цифровой осциллограф; *8* – фотоприемник

Fig. 1. A scheme of an experimental setup:

1 is a microwave oscillator; *2* is a diode laser; *3* is an optical insulator; *4* is the Fabry – Perot interferometer; *5* is a sawtooth voltage generator; *6* is a piezoceramic transducer; *7* is a digital oscilloscope; *8* is a photodetector

Излучение полупроводникового лазера (2) через оптический изолятор (3) подают на интерферометр Фабри – Перо (4), длину базы которого сканируют пилообразным напряжением от генератора (5), соединенного с пьзокерамическим преобразователем (6). Затем излучение поступает на фотоприемник (8), соединенный с цифровым осциллографом (7). Для синхронизации записываемого сигнала на другой канал осциллографа поступает сигнал от генератора пилообразного напряжения (5). Таким образом записывают эксперименталь-

ную форму пропускания интерферометра Фабри – Перо, используемую впоследствии для обработки спектров. Затем с помощью сверхвысокочастотного сигнала от генератора (1) модулируют ток инжекции полупроводникового лазера (2) и аналогичным образом записывают сложный спектр, обработку которого необходимо выполнить.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для обработки спектров был применен принципиально новый подход, основой которого стала программа, написанная специально для этой цели с помощью среды Matlab. Процесс обработки состоит из нескольких этапов.

На первом этапе производилась запись функции пропускания используемого ИФП в окрестностях положения несущей и боковых компонент первого порядка. Запись при различных напряжениях сканирования применялась для минимизации влияния нелинейности пьезокерамики. Пример такой записи приведен на рис. 2.

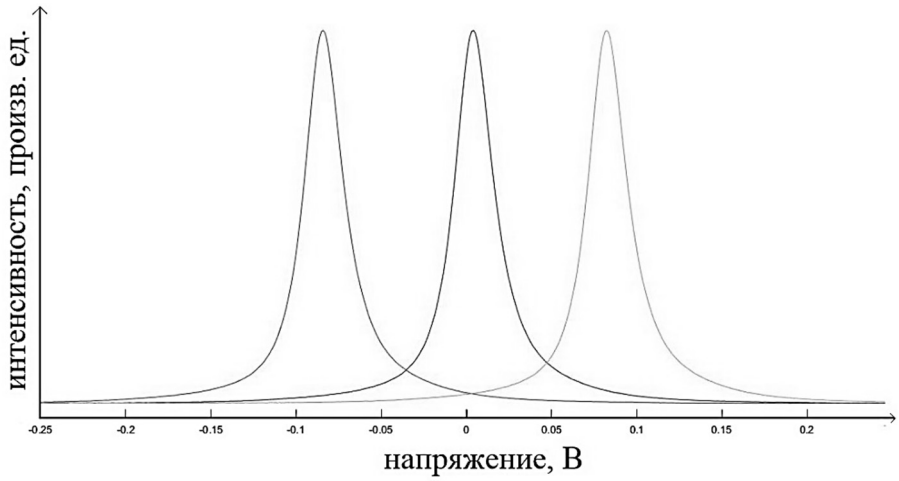


Рис. 2. Спектры излучения без модуляции, записанные возле центральной и боковых компонент

Fig. 2. Emission spectrum without modulation recorded near central and side bands

На втором этапе производилась запись спектров СВЧ-модулированного сигнала. При изменении различных параметров спектр менялся и появлялись более высокие порядки модуляции. В настоящей работе будет рассмотрен пример обработки спектра при модуляции частотой 3,5 ГГц.

На третьем этапе для каждого пика в обрабатываемом спектре лазера по методу наименьших квадратов были подобраны значения амплитуды и частотного положения форм пропускания, позволяющие при каждом значении по оси абсцисс минимизировать разницу между суммой этих форм и экспериментальным значением обрабатываемого спектра в этой точке. Таким образом, набор форм пропускания с различными амплитудами и положениями будет представлять собой истинный спектральный состав исследуемого излучения. Амплитуды и положения экспериментальных форм не будут совпадать с пи-

ками обрабатываемых спектров, поскольку после обработки будет учтено их взаимное влияние друг на друга и с обрабатываемым спектром будет совпадать лишь их поточечная сумма. На рис. 3 показана каждая из боковых компонент в отдельности и их суммарное распределение.

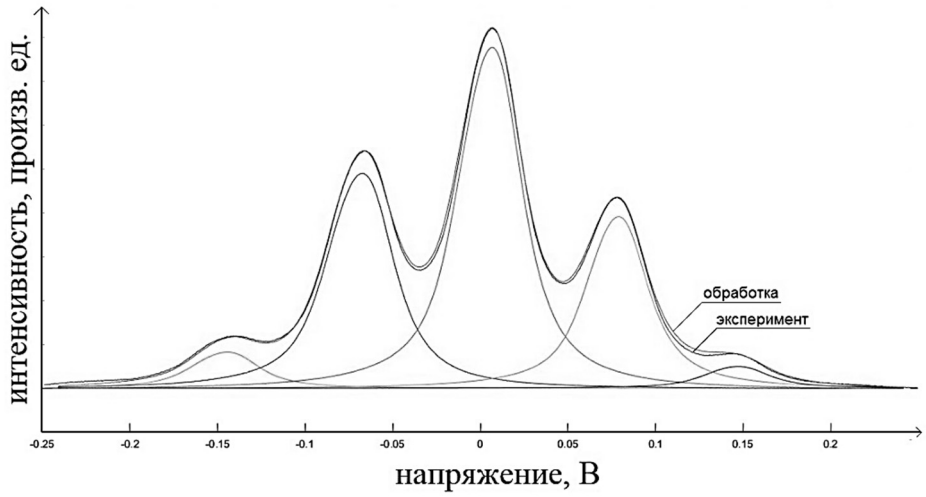


Рис. 3. Пример обработки сложного спектра при СВЧ-модуляции частотой 3,5 ГГц (экспериментально записанная и обработанная кривые)

Fig. 3. An example of composite spectrum processing under microwave modulation with frequency 3.5 GHz (an experimentally recorded curve and a processed one are marked)

Видно, что экспериментально записанный и обработанный спектр практически совпадают, что говорит о высокой точности метода. Некоторые расхождения наблюдаются только вблизи областей экстремума (–0,04 В и 0,12 В по оси абсцисс). Однако эти области не несут практического значения, поскольку для работы со спектрами, как правило, необходимо получать информацию об амплитуде и положении пика спектральных компонент.

Для сравнения была выполнена обработка этого же спектра с помощью широко известной формулы Эйри для пропускания интерферометра Фабри – Перо:

$$T = \frac{I}{1 + F\sin^2\left(\dfrac{2\pi d}{\lambda\cos\theta}\right)},$$

где T – пропускание интерферометра; I – интенсивность падающей волны; F – коэффициент остроты; d – зазор между входным и выходным зеркалами интерферометра; λ – длина волны падающего излучения; θ – угол падения светового луча на входное зеркало. В данном случае по методу наименьших квадратов были подобраны амплитуды компонент, частотное положение и коэффициент остроты интерферометра. Результат обработки представлен на рис. 4.

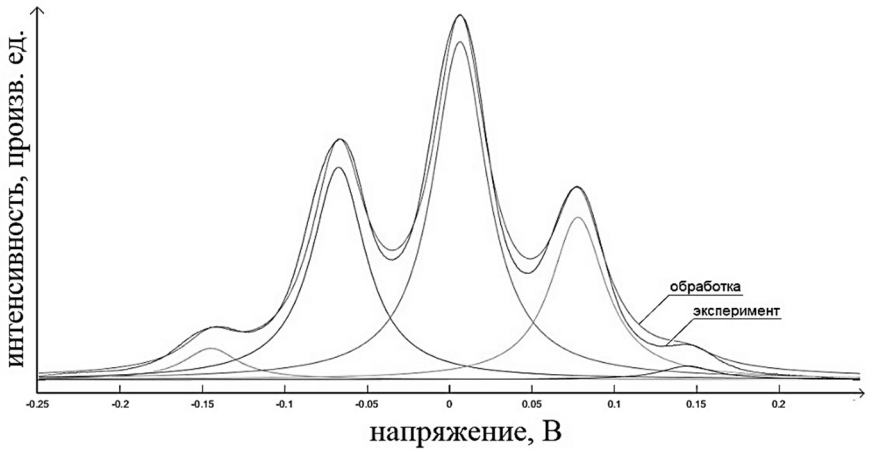


Рис. 4. Обработка сложного спектра с помощью функции Эйри (экспериментально записанная и обработанная кривые)

Fig. 4. Processing of a composite spectrum using the Airy function (an experimentally recorded curve and a processed one are marked)

Видно, что областей расхождения экспериментального и обработанного спектра существенно больше, чем на рис. 3, что говорит о существенной погрешности обработки.

Для более наглядной оценки точности была построена поточечная разность экспериментально записанного и обработанного двумя описанными методами спектра (рис. 5).

Для численной оценки точности была использована сумма квадратов значений разности, представленных на рис. 5. В случае обработки формулой Эйри сумма квадратов составляет 0,013, а при обработке предложенным методом – 0,0014, т. е. точность обработки предложенным методом выше примерно на порядок.

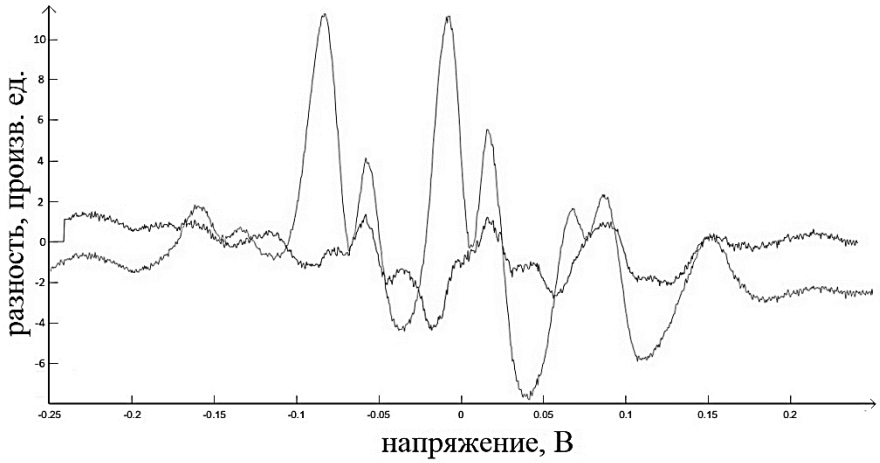


Рис. 5. Поточечная разность экспериментального и обработанного спектров:

темно-серая кривая – обработка предложенным методом, светло-серая кривая – с помощью функции Эйри

Fig. 5. Pointwise difference between the experimental and processed spectra:

dark grey curve is processing by the proposed method, light grey is using the Airy function

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описан принципиально новый метод обработки СВЧ-модулированного спектра излучения диодного лазера, записанного с помощью интерферометра Фабри–Перо. Показано, что использование экспериментально записанной формы пропускания ИФП дает на порядок меньшую погрешность, чем при использовании широко распространенной формулы Эйри. Этот результат можно объяснить тем, что формула Эйри хорошо описывает многопроходную интерференцию пучков, кривизна волнового фронта которых согласована с кривизной зеркал. В реальных экспериментах излучение лазера, как правило, не согласовано с интерферометром, поэтому использование экспериментальной формы пропускания для конкретного интерферометра и излучения дает лучшую точность.

Использование предложенного метода позволяет получить более точную информацию об амплитуде и положении спектральных компонент, что впоследствии может быть использовано в спектроскопии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Arimondo E., Orriols G.* Nonabsorbing atomic coherences by coherent two-photon transitions in a three-level optical pumping // Lettere al Nuovo Cimento. – 1976. – Vol. 17. – P. 333–338.

2. An experimental method for the observation of r.f. transitions and laser beat resonances in oriented Na vapour / G. Alzetta, A. Gozzini, M. Moi, G. Orriols // Il Nuovo Cimento B. – 1976. – Vol. 36 (1). – P. 5–20.

3. *Khripunov S., Radnatarov D., Kobtsev S.* Atomic clock based on a coherent population trapping resonance in 87Rb with improved high-frequency modulation parameters // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9378. – P. 93780A. – DOI: 10.1117/12.2080165.

4. Optical frequency standard based on the coherent population trapping resonance / E.V. Baklanov, S.N. Bagaev, A.K. Dmitriev, A.V. Taichenachev, V.I. Yudin // Laser Physics. – 2014. – Vol. 24, N 7. – P. 074007.

5. Light shifts in the rubidium CPT atomic clock with laser current modulation at 3.4 and 6.8 GHz / S.M. Ignatovich, I.S. Mesenzova, M.N. Skvortsov, N.L. Kvashnin, V.I. Vishnyakov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2067. – P. 012006.

6. *Савинов К.Н., Головин Н.Н., Дмитриев А.К.* КПН резонансы при многочастотной оптической накачке // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52, № 10. – С. 939–942.

7. Особенности режимов генерации полупроводникового лазера с внешним резонатором при СВЧ модуляции / А.А. Исакова, К.Н. Савинов, Н.Н. Головин, Н.Ж. Алтынбеков, В.И. Вишняков, А.К. Дмитриев // Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47, № 7. – С. 610–613.

8. Modulation properties of an extended cavity diode laser and dynamic mode splitting / S.A. Zibrov, D.S. Chuchelov, A.E. Drakin, D.A. Shiryaev, E.A. Tsygankov, M.I. Vaskovskaya, V.V. Vassiliev, V.L. Velichansky, A.P. Bogatov // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2020. – Vol. 56, N 3. – P. 2000607. – DOI: 10.1109/JQE.2020.2981120.

9. Measurement of spectral characteristics of semiconductor laser diodes-effect injected current modulation and optical feedback / A. Destrez, Z. Toffano, I. Joindot, C. Birocheau, L. Hassine // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1993. – Vol. 42, N 2. – P. 304–310.

10. Иттербиевый волоконный лазер с распределенной обратной связью с низким уровнем частотных шумов / М.А. Никулин, С.А. Бабин, А.К. Дмитриев, А.С. Дычков, С.И. Каблуков, А.А. Луговой, Ю.Я. Печерский // Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39, № 10. – С. 906–910.

11. Метод выделения спектральных компонент в сигналах путем интерполяции с помощью систем целочисленных сдвигов / Л.А. Минин, Н.М. Насер, Е.А. Киселев, С.Д. Кургалин // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 4. – С. 9–12.

12. Compact large-aperture Fabry-Pérot interferometer modules for gas spectroscopy at mid-IR / U. Kantojärvi, A. Varpula, T. Antila, C. Holmlund, J. Mäkynen, A. Näsilä, R. Mannila, A. Rissanen, J. Antila, R.J. Disch, T.A. Waldmann // Proceedings of SPIE. – 2014. – Vol. 8992. – P. 89920C. – DOI: 10.1117/12.2036336.

13. *Olesen H., Jacobsen G.* A theoretical and experimental analysis of modulated laser fields and power spectra // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1982. – Vol. QE-18, N 12. – P. 2069–2080.

14. *Танасюк Д.А., Горностаева С.И., Ермаков В.И.* Обработка оптических спектров поглощения и анализ составляющих полос на форму линии по Гауссу и Лоренцу // Исследовано в России. – 2006. – Т. 9, № 212. – С. 2018–2022.

15. *Скорняков Л.Г., Дёмин А.В., Денисова О.В.* Методики обработки результатов измерения спектров интенсивности источников излучения спектрофотометра СФ-56 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2019. – Т. 85, № 3. – С. 36–40.

Савинов Константин Николаевич, аспирант кафедры лазерных систем, младший научный сотрудник лаборатории квантовой криогенной электроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – лазерная физика, стандарты частоты, КПН-резонансы. Имеет 20 печатных работ. E-mail: k.n.savinov@yandex.ru

Головин Николай Николаевич, старший преподаватель кафедры лазерных систем, младший научный сотрудник лаборатории квантовой криогенной электроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – лазерная физика, спектроскопия, фемтосекундные лазеры. Имеет 35 печатных работ. E-mail: n.golovin@corp.nstu.ru

Дмитриева Лейла Рамисовна, аспирант кафедры лазерных систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – лазерная плазма, стандарты частоты, КПН-резонансы. Имеет 5 печатных работ. E-mail: dmitrieva-leyla@mail.ru

Дмитриев Александр Капитонович, доктор-физико-математических наук, профессор кафедры лазерных систем, главный научный сотрудник лаборатории квантовой криогенной электроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – лазерная физика, спектроскопия, фемтосекундные лазеры. Имеет 150 печатных работ. E-mail: alexander dmitriev@ngs.ru

Котина Дарья Михайловна, студент физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – лазерная физика, стандарты частоты, КПН-резонансы. Имеет одну печатную работу. E-mail: kotinadasha03@yandex.ru

Savinov Konstantin N., post-graduate student at the Department of Laser Systems, junior researcher inf the Laboratory of Quantum Cryogenic Electronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on laser physics, frequency standard, and CPT resonances. He has more than 20 publications. E-mail: k.n.savinov@yandex.ru

Golovin Nikolai N., senior lecturer of the Department of Laser Systems, junior researcher of the Laboratory of Quantum Cryogenic Electronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on laser physics, spectroscopy, and femtosecond lasers. He has more than 35 publications. E-mail: n.golovin@corp.nstu.ru

Dmitrieva Leyla R., a post-graduate student at the Department of Laser Systems, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on laser plasma, frequency standard, CPT resonances. She has more than 5 publications. E-mail: dmitrieva-leyla@mail.ru

Dmitriev Alexander K., D.Sc. (Phys.&Math.), professor at the Department of Laser Systems, chief researcher at the Laboratory of Quantum Cryogenic Electronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on laser physics, spectroscopy, and femtosecond lasers. He has more than 150 publications. E-mail: alexander_dmitriev@ngs.ru

Kotina Darya M., a student at Physical Engineering Faculty, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on laser physics, frequency standard, and CPT resonances. She has published 1 paper. E-mail: kotinadasha03@yandex.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-141-151

A method for processing the laser radiation spectrum based on the experimentally recorded transmission form of the Fabry – Perot interferometer *

K.N. SAVINOV [a], *N.N. GOLOVIN* [b], *L.R. DMITRIEVA* [c], *A.K. DMITRIEV* [d], *D.M. KOTINA* [e]

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 664033, Russian Federation

[a] *k.n.savinov@yandex.ru* [b] *n.golovin@corp.nstu.ru* [c] *dmitrieva-leyla@mail.ru*
[d] *alexander_dmitriev@ngs.ru* [e] *kotinadasha03@yandex.ru*

Abstract

At present, to create quantum frequency standards, the phenomenon of coherent population trapping (CPT) is widely used, in which, when a certain intensity is reached and the frequency interval between the spectral components coincides with the frequency of the hyperfine transition in an atom (most often in rubidium or cesium), a narrow resonance is observed in the absorption spectrum and the transmission of a cell with alkali metal vapor increases sharply. Since the amplitude of the CPT resonance critically depends on the intensity and position of the spectral components of the pump radiation, it is necessary to control the parameters of these components, which are usually recorded in digital form.

This paper describes a fundamentally new method for processing the laser emission spectrum recorded with a scanned Fabry – Perot interferometer (FPI), based on using the experimentally recorded transmission form of the scanned FPI as a reference spectral component. The paper presents examples of processing the experimentally recorded radiation spectra of a diode laser with an external resonator under microwave modulation of its injection current. The error of processing by the proposed method turned out to be approximately an order of magnitude smaller than when processing by the well-known Airy formula describing the transmission of the FPI. This is explained by the fact that the Airy formula is valid for light beams whose wave front curvature is consistent with the curvature of the IFP mirrors, which is often not true in the case of a real experiment.

The method can be used to process the spectra of modulated radiation of various types of lasers, which is an important task in detecting CPT resonances and further creating quantum frequency standards based on them.

Keywords: diode laser, emission spectrum, spectrum processing, frequency modulation, Airy formula, CPT resonance, frequency standard, Fabry-Perot interferometer

REFERENCES

1. Arimondo E., Orriols G. Nonabsorbing atomic coherences by coherent two-photon transitions in a three-level optical pumping. *Lettere al Nuovo Cimento*, 1976, vol. 17, pp. 333–338.

2. Alzetta G., Gozzini A., Moi M., Orriols G. An experimental method for the observation of r.f. transitions and laser beat resonances in oriented Na vapour. *Il Nuovo Cimento B*, 1976, vol. 36, pp. 5–20.

* *Received 02 March 2023.*

This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project № FSUN-2023-0007).

3. Khripunov S., Radnatarov D., Kobtsev S. Atomic clock based on a coherent population trapping resonance in 87Rb with improved high-frequency modulation parameters. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9378, p. 93780A. DOI: 10.1117/12.2080165.

4. Baklanov E.V., Bagaev S.N., Dmitriev A.K., Taichenachev A.V., Yudin V.I. Optical frequency standard based on the coherent population trapping resonance. *Laser Physics*, 2014, vol. 24, no. 7, p. 074007.

5. Ignatovich S.M., Mesenzova I.S., Skvortsov M.N., Kvashnin N.L., Vishnyakov V.I. Light shifts in the rubidium CPT atomic clock with laser current modulation at 3.4 and 6.8 GHz. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2067, p. 012006.

6. Savinov K.N., Golovin N.N., Dmitriev A.K. KPN rezonansy pri mnogochastotnoi opticheskoi nakachke [CPT resonances under multifrequency optical pumping]. *Kvantovaya elektronika = Quantum Electronics*, 2022, vol. 52, no. 10, pp. 939–942. (In Russian).

7. Isakova A.A., Savinov K.N., Golovin N.N., Altynbekov N.Zh., Vishnyakov V.I., Dmitriev A.K. Osobennosti rezhimov generatsii poluprovodnikovogo lazera s vneshnim rezonatorom pri SVCh modulyatsii [Specific features of oscillation regimes of an external cavity diode laser under microwave modulation]. *Kvantovaya elektronika = Quantum Electronics*, 2017, vol. 47, no. 7, pp. 610–613. (In Russian).

8. Zibrov S.A., Chuchelov D.S., Drakin A.E., Shiryaev D.A., Tsygankov E.A., Vaskovskaya M.I., Vassiliev V.V., Velichansky V.L., Bogatov A.P. Modulation properties of an extended cavity diode laser and dynamic mode splitting. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2020, vol. 56, no. 3, p. 2000607. DOI: 10.1109/JQE.2020.2981120.

9. Destrez A., Toffano Z., Joindot I., Birocheau C., Hassine L. Measurement of spectral characteristics of semiconductor laser diodes-effect injected current modulation and optical feedback. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1993, vol. 42, no. 2, pp. 304–310.

10. Nikulin M.A., Babin S.A., Kablukov S.I., Dmitriev A.K., Dychkov A.S., Lugovoy A.A., Pecherskii Yu.Ya. Itterbievyi volokonnyi lazer s raspredelennoi obratnoi svyaz'yu s nizkim urovnem chastotnykh shumov [Low frequency noise distributed-feedback ytterbium fibre laser]. *Kvantovaya elektronika = Quantum Electronics*, 2009, vol. 39, no. 10, pp. 906–910. (In Russian).

11. Minin L.A., Nasir N.M., Kiselev E.A., Kurgalin S.D. Metod vydeleniya spektral'nykh komponent v signalakh putem interpolyatsii s pomoshch'yu sistem tselochislennykh sdvigov [Method of extraction of spectral components in signals by interpolation via systems of integer shifts]. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital Signal Processing*, 2014, no. 4, pp. 9–12.

12. Kantojärvi U., Varpula A., Antila T., Holmlund C., Mäkynen J., Näsilä A., Mannila R., Rissanen A., Antila J., Disch R.J., Waldmann T.A. Compact large-aperture Fabry-Pérot interferometer modules for gas spectroscopy at mid-IR. *Proceedings of SPIE*, 2014, vol. 8992, p. 89920C. DOI: 10.1117/12.2036336.

13. Olesen H., Jacobsen G. A theoretical and experimental analysis of modulated laser fields and power spectra. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, vol. QE-18, no. 12, pp. 2069–2080.

14. Tanasyuk D.A., Gornostaeva C.I., Ermakov V.I. Obrabotka opticheskikh spektrov pogloshcheniya i analiz sostavlyayushchikh polos na formu linii po Gaussu i Lorentsu [Processing of optical absorption spectra and analysis of constituent bands for the shape of a line by Gauss and Lorentz]. *Issledovano v Rossii = Investigated in Russia*, 2006, vol. 9, no. 212, pp. 2018–2022.

15. Skornyakov L.G., Demin A.V., Denisova O.V. Metodiki obrabotki rezul'tatov izmereniya spektrov intensivnosti istochnikov izlucheniya spektrofotometra SF-56 [Approximation methods used for processing measurements of the intensity spectra of radiation sources of SF-56 spectrophotometers]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2019, vol. 85, no. 3, pp. 36–40.

Для цитирования:

Способ обработки спектра излучения лазера на основе экспериментально записанной формы пропускания интерферометра Фабри-Перо / К.Н. Савинов, Н.Н. Головин, Л.Р. Дмитриева, А.К. Дмитриев, Д.М. Котина // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 3 (91). – С. 141–151. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-141-151.

For citation:

Savinov K.N., Golovin N.N., Dmitrieva L.R., Dmitriev A.K., Kotina D.M. Sposob obrabotki spektra izlucheniya lazera na osnove eksperimental'no zapisannoi formy propuskaniya interferometra Fabri-Pero [A method for processing the laser radiation spectrum based on the experimentally recorded transmission form of the Fabry-Perot interferometer]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 3 (91), pp. 141–151. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-141-151.

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, телевещания и средств массовых коммуникаций в 2000 году. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1599 от 10.02.2000. Периодичность выхода издания – один раз в три месяца (четыре номера в год). В 2021 году был переименован в «Системы анализа и обработки данных». Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование.

В журнале «Системы анализа и обработки данных» публикуются оригинальные статьи по следующим группам специальностей:

1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки), *ранее* 05.13.18;

2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы (технические науки), *ранее* 05.11.07;

2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки), *ранее* 05.11.16;

2.2.12 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки), *ранее* 05.11.17;

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки), *ранее* 05.13.01;

2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки), *ранее* 05.13.11.

Разделы журнала: информационные технологии и телекоммуникации; компьютерные науки и информатика; электроника, фотоника, приборостроение и связь.

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 состоявшихся и планируемых конференциях, семинарах и симпозиумах, сведений о факультетах и специальностях, научных разработках и научных школах. Статьи обзорного характера, как правило, не публикуются.

Website: http://journals.nstu.ru/vestnik

Условия приема статей

В редакцию журнала представляются следующие материалы.

1. Статья, подготовленная в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, два экземпляра, подписанных авторами.

2. Контактная информация (телефоны рабочий и сотовый, адреса электронной почты, место работы, адрес места работы, должность, ученая степень, ученое звание автора, ORCID) – 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 и сканированный лицензионный договор – в отдельных файлах на CD.

6. Экспертное заключение о возможности опубликования.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Требования к оформлению статьи

Формат оригинала **– А4**. 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 размером 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, межстрочный интервал 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**), набираются прописным полужирным прямым шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними оставляется пустая строка размером 20, после них – пустая строка размером 10. Основной текст – кеглем 10.

Подзаголовки – прописным полужирным шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними и после них – пустая строка размером 10.

Рисунки представляются в **Corel Draw 11** или **Microsoft Word (RUS)**. Рисунки в других редакторах не принимаются. Слово *Рис*. и его номер выделяются курсивом. Рисунки должны быть черно-белыми, в описании не должно быть ссылок на цвет.

Рисунки и таблицы нумеруются арабскими цифрами по порядку упоминания их в тексте. После номера должно следовать название **на русском и английском языках**. Подрисуночные подписи и названия таблиц – кеглем 9.

Все графы в таблицах должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями. В головке таблицы по возможности указываются буквенные обозначения параметров и их единицы измерения.

Переменные в тексте набираются курсивным шрифтом кеглем 10. При написании формул использовать MathType версии не выше 6.0C. Формулы набирать по центру кеглем 11, надстрочные и подстрочные индексы – кеглем 9, знаки – кеглем 14 (латинские буквы – курсивным шрифтом, русские и греческие – прямым, цифры – прямым).

Например:

$$A(s) = \sum_{i=0}^{n^2+3} A_i s \lambda^{(i+1)^2} + \alpha .$$

Между текстом и формулами, а также между формулами оставляются пустые строки размером 4. Формулы не сжимать. Нумерацию формул указывать справа кеглем 10. Например:

$$D_f = D_c D + N_c N. \qquad (1)$$

Нумерация страниц осуществляется следующим образом: Вставка / Номера страниц...; установить **положение** «вверху страницы», **выравнивание** – «снаружи», без нумерации первой страницы.

Колонтитулы устанавливаются вверху (с отступом от верхнего края страницы 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 на четных страницах. 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 с прописной буквы курсивным шрифтом кеглем 8, номера страниц – кеглем 10.

Перед списком литературы 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 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. **Информация предоставляется на русском и английском языках**.

Далее дается перевод на английский язык фамилии, имени, отчества автора 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://journal.nstu.ru/vestnik.