

ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 – 74159 от 02.11.2018).

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Подписной индекс в «Каталоге периодических изданий. Газеты и журналы» ГК «Урал Пресс» - 41891. Физические лица могут оформить подписку в интернет-магазине «Деловая пресса» <http://www.ural-press.ru/dlya-fizicheskikh-lits/>

Журнал «Вестник Воронежского государственного технического университета» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Журнал выходит шесть раз в год

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор В.Р. Петренко, д-р техн. наук – Воронеж

Заместитель главного редактора И.Г. Дроздов, д-р техн. наук – Воронеж

Ответственный секретарь Ю.В. Татаренко – Воронеж

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

В.Н. Бурков – д-р техн. наук – Москва;
Д.А. Новиков – д-р техн. наук – Москва;
С. Лухан-Мора – проф. – Испания;
А.К. Погодаев – д-р техн. наук – Липецк;
А.Ф. Тузовский – д-р техн. наук – Москва;
С.Л. Подвальный – д-р техн. наук – Воронеж;
В.Л. Бурковский – д-р техн. наук – Воронеж;
В.В. Куц – д-р техн. наук – Курск;
А.Г. Ивахненко – д-р техн. наук – Курск;
В.П. Смоленцев – д-р техн. наук – Воронеж;
С.Г. Бишутин – д-р техн. наук – Брянск;
В.Ф. Селиванов – д-р техн. наук – Воронеж;
О.Н. Кириллов – д-р техн. наук – Воронеж;
О.Ю. Макаров – д-р техн. наук – Воронеж;
В.П. Пашинцев – д-р техн. наук – Ставрополь;
Ю.Г. Пастернак – д-р техн. наук – Воронеж;
А.В. Ашихмин – д-р техн. наук – Воронеж;
П.П. Чураков – д-р техн. наук – Пенза;
А.А. Гладких – д-р техн. наук – Ульяновск;
А.В. Башкиров – д-р техн. наук – Воронеж

Ответственность за подбор и изложение фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений несут авторы публикаций. Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке статей ссылка на журнал обязательна.

Адрес редакции: 394026, Воронеж, Московский проспект, дом 14, комн. 212

Телефон: +7 (473) 246-28-63

E-mail: vestnik@vorstu.ru

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Адрес издателя: 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2023

12+

BULLETIN OF VORONEZH STATE TECHNICAL UNIVERSITY

The journal is registered by the Federal service for supervision of communications, information technology, and mass media (registration certificate PI № FS 77 – 74159 02 November 2018)

Founder: Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”

Subscription index in the «Catalog of periodicals. Newspapers and magazines» of the «Ural Press» Group of Companies – 41891. Individuals can subscribe to it in the online store "Business Press" <http://www.ural-press.ru/dlya-fizicheskikh-lits/>

The journal "Bulletin of Voronezh State Technical University" is included into the list of peer-reviewed editions in which the results of dissertations for obtaining degrees of a Full Doctor and PhD are published.

The journal is published six times a year

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief V.R. Petrenko, Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh
Deputy Editor-in-Chief I.G. Drozdov, Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh

Executive secretary Yu.V. Tatarenko – Voronezh

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

V.N. Burkov – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;
D.A. Novikov – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;
Sergio Lujan Mora – Professor – Spain;
A.K. Pogodaev – Dr. Sc. (Tech.) – Lipetsk;
A.F. Tuzovskiy – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;
S.L. Podvalny – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.L. Burkovskiy – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.V. Kuts – Dr. Sc. (Tech.) – Kursk;
A.G. Ivakhnenko – Dr. Sc. (Tech.) – Kursk;
V.P. Smolentsev – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
S.G. Bishutin – Dr. Sc. (Tech.) – Bryansk;
V.F. Selivanov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
O.N. Kirillov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
O.Yu. Makarov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.P. Pashintsev – Dr. Sc. (Tech.) – Stavropol;
Yu.G. Pasternak – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
A.V. Ashihmin – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
P.P. Churakov – Dr. Sc. (Tech.) – Penza;
A.A. Gladkikh – Dr. Sc. (Tech.) – Ulyanovsk;
A.V. Bashkirov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh

The authors of publications are responsible for the selection and presentation of facts, quotations, statistics and other information. The articles coming to the editorial office are reviewed. The opinion of the editors may not coincide with the opinion of the authors of the materials. When reprinting articles, the link to the journal is obligatory.

Address: 394026, Voronezh, Moskovskiy prospekt, 14, office 212

Phone number: +7(473)246-28-63

E-mail: vestnik@vorstu.ru

Publisher: Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”

Publisher address: 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya str., 84

© Voronezh State Technical University, 2023

12+

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Разработка программного обеспечения для визуализации процессов полимеризации К.Г. Резников, С.Л. Подвальный	7
Проблематика управления технологическими процессами в дорожном строительстве В.Л. Бурковский, И.Н. Волков	15
Исследование нештатной эксплуатации системы регулирования паровой турбины и ее моделирование на базе возможностей Any Logic Р.С. Дударев, М.И. Чижов	21
Использование свёрточных нейронных сетей для анализа изображений М.А. Лихотин	27
Разработка специального математического обеспечения системы управления потоком поступающих заявок С.А. Олейникова, А.В. Дятчина	33
Математическое моделирование работы длинной линии на основе представления в качестве цепи с распределенными параметрами И.С. Киреев, И.В. Зубарев, В.Л. Бурковский	38
Моделирование электромеханических процессов в твердотельном волновом гироскопе с пьезоэлектрическими преобразователями И.Л. Батаронов, Г.Е. Шунин, С.А. Кострюков, В.В. Пешков	45
Совершенствование экологической оценки объекта недвижимости методами программной инженерии О.В. Курипта, Ю.А. Воробьева, О.В. Минакова	53
Поддержка принятия решений при управлении производством углеродных нанотрубок с заданными параметрами Е.А. Буракова	61
Имитационная модель управления полетом группы беспилотных летательных аппаратов на основе алгоритма пчелиной колонии К.В. Егорова	68
Определение оптимального набора переменных при помощи методов машинного обучения при исследовании рейтинговых систем И.А. Седых, И.В. Стругов	72
Сравнение быстродействия численных методов Гаусса и LUP-разложения в задаче нахождения равновесного химического состава П.А. Сеченов	79
Алгоритм адаптивного оценивания параметров нелинейных нестационарных систем Нгуен Хак Тунг	86
Метод контрастирования изображений средствами модифицированного S-образного преобразования яркости Д.В. Начаров	94

Радиотехника и связь

Методика проектирования и реализация цифрового фильтра с несколькими полосами пропускания для приложений 5G А.В. Башкиров, Р.Н. Хорошайлов, И.А. Турецкий.....	103
Исследование электроиндукционного датчика напряженности электромагнитного поля цилиндрической формы направленного приема С.В. Бирюков.....	111
Измерение высокочастотных потерь в магнитных обмотках понижающего преобразователя А.В. Башкиров, Я.В. Скитский, Н.Ю. Веретенников.....	119

Машиностроение и машиноведение

Исследование технологии изготовления слоистых панелей для горячей части турбореактивного двигателя В.И. Федосеев, М.В. Молод, В.И. Максименков.....	124
Исследование осевой силы и температуры в зоне резания при протягивании на основе компьютерного моделирования В.В. Куц, В.С. Кочергин, О.Н. Кириллов, М.В. Якин.....	129
Слоистая панель для канала воздухозаборника самолета В.И. Максименков, М.В. Молод, П.С. Огурцов.....	135

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Software development for rendering of polymerization processes K.G. Reznikov, S.L. Podvalny	7
Problems of technological processes management in road construction V.L. Burkovskiy, I.N. Volkov	15
Study of emergency operation of a steam turbine control system and its simulation based on Any Logic capabilities R.S. Dudarev, M.I. Chizhov	21
Use of convolutional neural networks for prediction of brain tumors M.A. Likhotin	27
Development of special mathematical software for the system of control of the incoming applications flow S.A. Oleinikova, A.V. Dyatchina	33
Mathematical modeling of long line operation based on representation as a chain with distributed parameters I.S. Kireev, I.V. Zubarev, V.L. Burkovsky	38
Simulation of electromechanical processes in a solid-state wave gyroscope with piezoelectric transducers I.L. Bataronov, G.E. Shunin, S.A. Kostyukov, V.V. Peshkov	45
Improving the environmental assessment of a real estate object by software engineering methods O.V. Kuripta, Yu.A. Vorob'eva, O.V. Minakova	53
Decision support when managing the production of carbon nanotubes with specified settings E.A. Burakova	61
Simulation model of flight control of a group of unmanned aerial vehicles based on the bee colony algorithm K.V. Egorova	68
Determination of the optimal set of variables using machine learning methods in the study of rating systems I.A. Sedykh, I.V. Strugov	72
Comparison of the speed of numerical methods of Gaussian and LUP decomposition in the problem of finding the equilibrium chemical composition P.A. Sechenov	79
Algorithm for adaptive estimation of parameters for nonlinear nonstationary systems N.K. Tung	86
Image contrast enhancement by means of modified S-shaped intensity transform D.V. Nacharov	94

Radio engineering and communication

Design methodology and implementation of a digital filter with multiple pass bands for 5G applications A.V. Bashkirov, R.N. Khoroshailov, I.A. Turetskiy	103
Investigation of electric induction sensor of electromagnetic field strength cylindrical directional reception S.V. Biryukov	111
Measurement of high-frequency losses in the magnetic windings of a buck converter A.V. Bashkirov, Ya.V. Skitsky, N.Yu. Veretennikov	119

Mechanical engineering and science of machines

Study of the technology of manufacturing noise reduction honeycomb panels for the hot part of a turbojet engine V.I. Fedoseev, M.V. Molod, V.I. Maksimenkov	124
Investigation of axial force and temperature in the cutting zone at stretching based on computer simulation V.V. Kuts, V.S. Kochergin, O.N. Kirillov, M.V. Yakin	129
Layered panel for the air intake channel of the aircraft V.I. Maksimenkov, M.V. Molod, P.S. Ogurtsov	135

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.36622/VSTU.2023.19.2.001

УДК 004.94, 681.3

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ

К.Г. Резников, С.Л. Подвальный

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлена реализация программного обеспечения для визуализации процессов полимеризации для последующего анализа изображений молекулярно-массовых распределений полимеров в заданном интервале времени. Описано математическое моделирование полимеризации. Рассмотрены основные стадии процесса полимеризации и способы их классификации. Представлены стадии обрыва и подробно рассмотрен типовой модуль для механизма случайного обрыва. Описана кинетика полимеризации случайного обрыва. Реализован и описан алгоритм расчета молекулярно-массового распределения полимера с введением условного времени полимеризации. Представлены блок-схема и способы визуализации вычисленных результатов работы алгоритма. Разработано программное обеспечение для расчета молекулярно-массового распределения полимера и отрисовки полученных данных. Продемонстрирован пример выполнения программного обеспечения с вычислением молекулярно-массового распределения в определенные моменты условного времени для механизма случайного обрыва. Проведен анализ полученного молекулярно-массового распределения. Описаны результаты сравнения с основными распределениями. Представлен способ оптимизации визуализации вычисленных результатов работы алгоритма для более детального исследования молекулярно-массового распределения полимеров в зависимости от условного времени. Разработанное программное обеспечение позволяет рассматривать различные модули механизма обрыва, заменив исходную модель механизма случайного обрыва, вносить корректировки и наглядно видеть изменения модели, а также проводить оценку течения процесса

Ключевые слова: математическое моделирование, визуализация, полимеризация, химические процессы, программное обеспечение

Введение

Трехмерное моделирование и методы визуализации позволяют отобразить на плоскости различные геометрические модели, преобразовать абстрактные, математические, физические, химические и другие модели в наглядные визуальные формы. Визуализация позволяет провести зрительный анализ и дать оценку изучаемой модели.

Визуализация физических и химических процессов является важным направлением в трехмерном моделировании. Визуализация процессов дает возможность рассмотреть состояние процесса с заданными параметрами модели, либо корректировать параметры и наблюдать визуальное изменение модели. Например, изменяя параметр времени, который часто является важнейшим параметром рассматриваемой системы.

Одной из систем, зависящих от времени, является процесс полимеризации.

Исследование процессов полимеризации является важным направлением в химии и

техническом прогрессе в целом. Современные вычислительные системы значительно продвинули изучение процессов полимеризации. Они позволяют моделировать различные процессы с учетом множества дополнительных факторов, приближаясь к действительным химическим процессам с незначительными погрешностями. С каждым годом, вычислительные мощности возрастают, а, значит, возрастает точность математического моделирования систем.

В моделировании химических реакторов выделяется этап построения математических моделей через более простые элементы, описывающие химические реакции, процессы теплопередачи, массопередачи и другие.

Такой подход позволяет реализовать алгоритм работы химической модели на вычислительной системе.

Реализация алгоритма на вычислительной системе дает возможность получать промежуточные вычислительные результаты на разных этапах работы алгоритма. Это позволяет предварительно или по итогу расчета модели оценивать модель и вносить корректировки при необходимости.

Результаты вычисления модели может быть ресурсозатратными или невозможными для анализа из-за большого количества значений, либо слишком больших или мелких чисел, что приводит к дополнительным погрешностям или ошибкам.

В таких случаях одним из решений подобных проблем, может быть визуализация различных этапов расчета модели.

Отличие от всех иных химических процессов, в процессе полимеризации рассматривают полимер с молекулярно-массовым распределением (ММР), а не с фиксированным молекулярным распределением продукта. Для ММР полимеров в некоторых случаях, при определенных базовых константах и в некий момент времени, получаются различные известные распределения. Например, распределение Флори или Бизли.

Для исследования процесса полимеризации требуется разработать программное обеспечение для визуализации распределений полимера в определенные моменты времени. Визуальное представление моделей с последующим анализом позволит ответить на следующие вопросы:

1. Как изменяется ММР полимера во времени?
2. К какому типу относится распределение полимера в определенный момент времени?
3. Изменяется ли тип полимера в зависимости от времени?

В данной статье будет рассмотрена реализация программного обеспечения для визуализации ММР полимера в определенный интервал времени.

Рассмотрим подробнее процесс полимеризации.

Процесс полимеризации

Математическое моделирование процесса полимеризации представляет собой решение систем дифференциальных уравнений большого количества, в основном бесконечных [1]. Рассмотрим детально процесс полимеризации.

Как во всяком процессе, выделяют основные стадии. Для процесса полимеризации имеем:

- *иницирование*,
- *рост*,
- *обрыв*,
- *передача цепи*.

Существуют различные способы классификации полимеризационных процессов [1].

Для решения задач математического моделирования удобно классифицировать процессы по формальному признаку. Под формальным признаком будем понимать порядок уравнений скорости элементарных стадий по реакционным компонентам.

Для стадии инициирования выделим следующие случаи:

- по мономеру:
 - нулевой,
 - первый,
 - второй;
- по катализатору:
 - первый,
 - дробный;
- общий порядок реакции (не выше третьего)

На рис. 1 представлена обобщенная схема стадии инициирования.

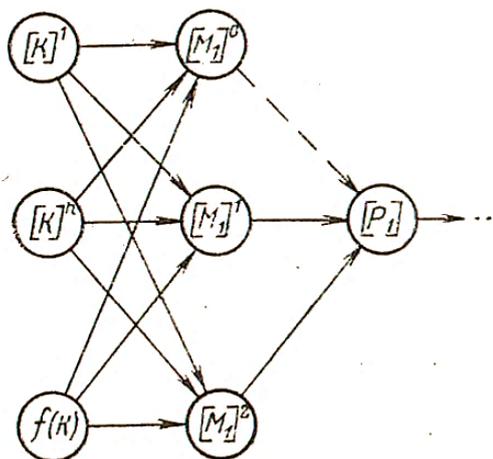


Рис. 1. Схема стадии инициирования

Для стадии роста:

- по мономеру:
 - первый,
- по активному полимеру
 - первый,
 - дробный;
- общий порядок реакции (второй).

Для стадии обрыва и передачи цепи:

- по активному полимеру
 - первый,
 - второй;
- по мономеру, растворителю и др.:
 - нулевой,
 - первый;
- общий порядок реакции (не выше третьего).

На рис. 2 представлена обобщенная схема стадии роста.

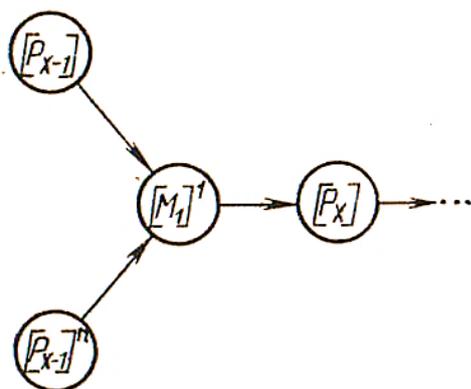


Рис. 2. Схема стадии роста

На рис. 3 представлена обобщенная схема стадий обрыва и передачи цепи.

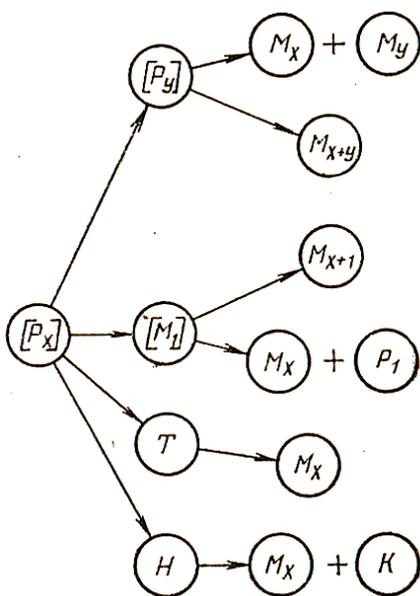


Рис. 3. Схема стадии обрыва и передачи цепи

В статье будем рассматривать типовой случай [1]. Стадия иницирования является реакцией первого порядка по мономеру. K_i зададим как константу концентрации катализатора иницирования. Стадия роста является суммарной реакцией второго порядка. В таком варианте выделим следующие стадии обрыва:

- случайный обрыв,
- мономерный обрыв,
- комбинированный обрыв,
- диспропорциональный обрыв,
- безобрывная полимеризация.

Рассмотрим типовой модуль для механизма случайного обрыва [2].

Кинетику процесса полимеризации опишем следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM_1}{dt} &= -K_i M_1 - K_p M_1 \left(\sum_{x=1}^{\infty} P_x \right) + K_t P_1 \\ \dots \\ \frac{dM_x}{dt} &= K_t P_x \text{ для } 2 \leq x < \infty \\ \frac{dP_1}{dt} &= K_i M_1 - K_p M_1 P_1 - K_t P_1 \\ \dots \\ \frac{dP_x}{dt} &= K_p M_1 (P_{x-1} - P_x) - K_t P_x \\ &\text{для } 2 \leq x < \infty \end{aligned} \right\} (1)$$

В (1) K_i, K_p, K_t являются константами элементарных стадий иницирования, роста и обрыва цепи в единицах л/моль*мин.

Решив систему (1), определим концентрации цепей $M = \{M_1, M_2, \dots, M_x\}$ и $P = \{P_1, P_2, \dots, P_x\}$. На основе рассчитанных концентраций получим итоговые распределения. Численные решения известны и разработаны, но существует проблема большого количества уравнений. Современные вычислительные системы позволяют решить системы с более чем 10 000 уравнений.

Для решения поставленных задач требуется решение систем бесконечного числа уравнений (1) с вычислением множества решений системы по времени $t \in [0, +\infty)$ в минутах.

Если преобразовать систему (1), умножить на x^j , а затем сложить и ограничить систему моментами второго порядка, то получим систему:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM_1}{dt} &= -K_i M_1 - K_p M_1 \mu_0 + (K_t - K_p M_1) P_1 \\ \frac{dP_1}{dt} &= K_i M_1 - (K_t + K_p M_1) P_1 \\ \frac{d\mu_0}{dt} &= K_p M_1 P_1 - K_t \mu_0 \\ \frac{d\mu_1}{dt} &= K_p M_1 (2P_1 + \mu_0) - K_t \mu_1 \\ \frac{d\mu_2}{dt} &= K_p M_1 (4P_1 + 2\mu_1 + \mu_0) - K_t \mu_2 \\ \frac{d\lambda_0}{dt} &= K_t \mu_0 \\ \frac{d\lambda_1}{dt} &= K_t \mu_1 \\ \frac{d\lambda_2}{dt} &= K_t \mu_2 \end{aligned} \right\} (2)$$

Решение системы (2) позволяет вычислить большинство статистических характеристик [3].

Введем условное время

$$\tau = K_t \int_0^t M_1(t) dt \quad (3)$$

Вычисление решения системы (2) при $t = 10^7$ [2], будем считать достаточно большим, чтобы вычислить интеграл условного времени (3). Полученное значение $\bar{\tau}$ нормализуем к единице.

Решение системы (1), зависящем от τ и нормализованному к интервалу $[0,1]$, является распределением M и P в момент времени t . Тогда при $\tau = 0$ распределения цепей являются начальным состоянием полимера, а при $\tau = 1$ конечным состоянием.

Для полученных наборов распределений при различных τ можно вычислить статистические характеристики. Далее для каждого распределения можно определить его тип.

Итоговый алгоритм рассмотрим далее.

Алгоритм расчета ММР полимера и визуализация

Шаг 1. Вводятся начальные параметры и константы исходной системы K_i, K_p, K_t .

Шаг 2. Расчет системы (2) методом Рунге-Кутты 4-го порядка.

Шаг 3. Вычисление статистических характеристик распределений M_1 и P_1 .

Шаг 4. Вычисление τ и нормализация полученного значения $\bar{\tau}$ к единице.

Шаг 5. Расчет системы (1) в зависимости от условного времени τ .

Шаг 6. Анализ, визуализация и определение типа распределений.

Блок схема алгоритма представлена на рис. 4.

По полученным наборам решений M и P построим графики распределений. Для более компактного вида и более удобного анализа ММР полимера отложим по оси абсцисс M_x от функции натурального логарифма \ln , а по оси ординат полученные соответствующие значения.

На основе вычисленных наборов M и P и их статистических характеристик для каждого ММР полимера можно рассчитать основные типы распределений и провести анализ.

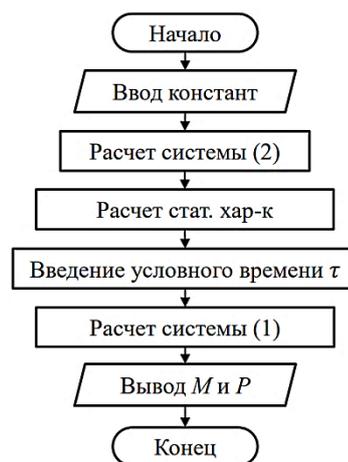


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета цепей

Рассмотрим способ визуализации полученных расчетов.

Визуализация распределения полимера

За основу для визуализации распределения полимера будем использовать программное обеспечение для визуализации кинематических моделей [4]. Алгоритм построения и визуализации кинематической поверхности, использованный в разработке представлен в статье [5]. Для реализации программного обеспечения для визуализации процессов полимеризации, представленного в данной статье, использовались методы компьютерной графики [6]. Программная реализация интерфейса и расчета поверхности разработана на фреймворке Vue [7]. Исходный код приложения размещен в свободном доступе [8]. Алгоритм расчета систем (1-2) описан на языке Python с использованием библиотеки SciPy [9].

Исходный алгоритм построения полигональной сетки кинематической модели был преобразован.

Образующая и направляющая модели заменены на динамично-вычисленные линии. Схема получения поверхности по образующей и направляющей представлена на рис. 5.

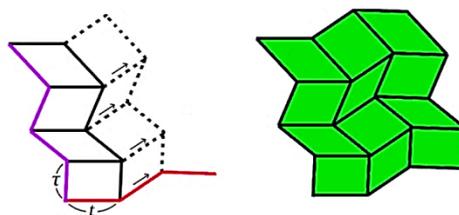


Рис. 5. Схема образования полигональной сетки

За образующую взяты расчеты в определенный момент времени. За направляющую взяты отложенные точки на плоскости выстроенные в линию и соответствующие определенному времени τ . Таким образом, на каждом шаге отрисовки образующей по направляющей, строится полигональная сетка.

Рассмотрим пример расчета и визуализации M и P полимера и основных типов распределений.

Пример выполнения визуализации

Рассмотрим пример расчета и визуализации ММР полимера.

Зададим базовые константы $K_i = 5 \cdot 10^{-5}$, $K_p = 32$, $K_t = 0.1$ [2]. Количество уравнений для системы (1) и ограничение по времени t зададим как 10^7 ($\tau = 1$).

В итоге, при расчетах в разные моменты времени получим поверхность, изображенную на рис. 6.

Для ответа на поставленные вопросы рассмотрим подробнее и проведем анализ расчетов в определенный момент времени.

На рис. 7 и 8 представлены результаты вычислений системы (1) ММР для M и P соответственно, в момент условного времени $\tau = 0.3$.

Рассмотрим более детально результаты расчета активных цепей. Добавим на графики основные распределения [3] и сравним их.

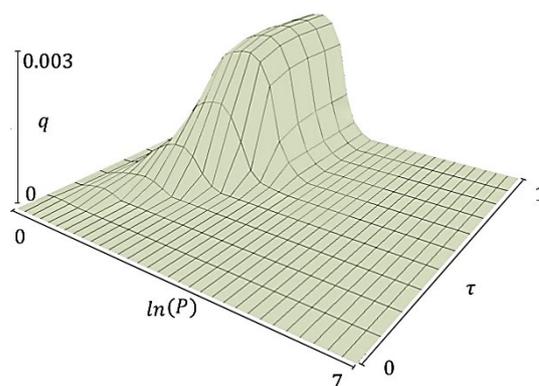


Рис. 6. Поверхность расчета ММР полимера по времени τ для активных цепей P

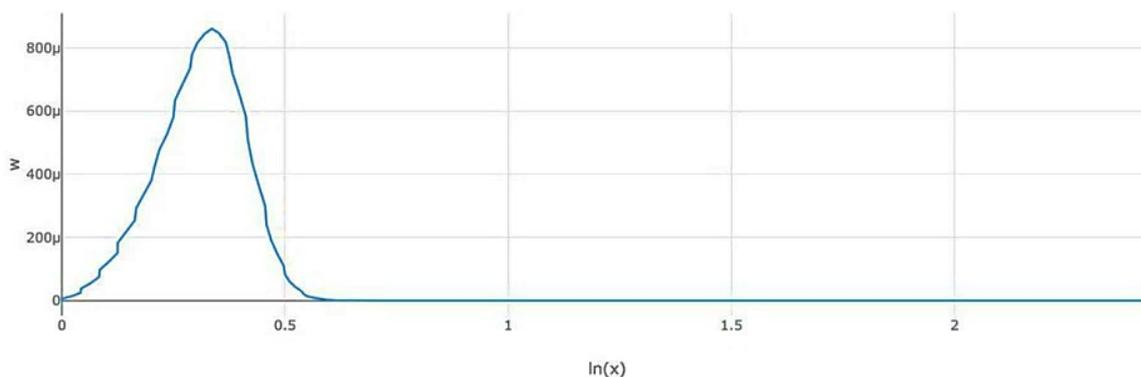


Рис. 7. Результаты расчета ММР неактивных цепей

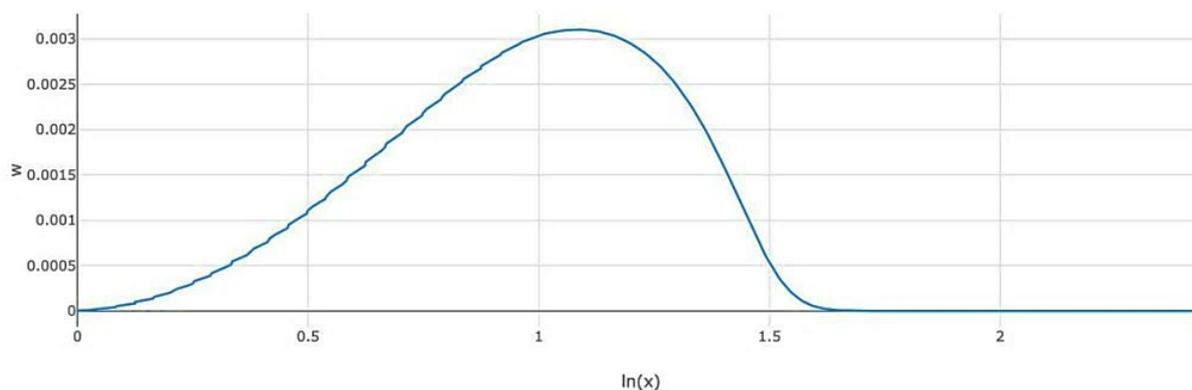
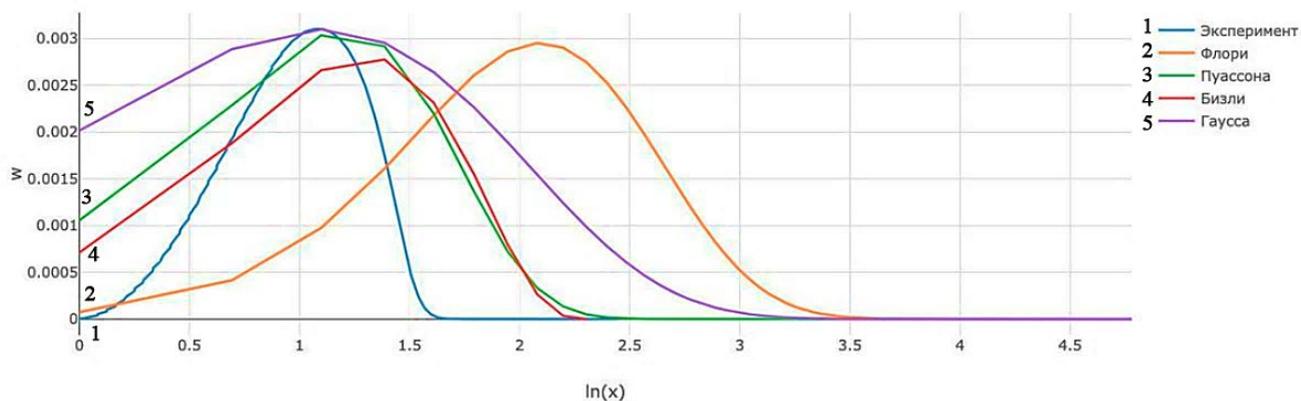


Рис. 8. Результаты расчета ММР активных цепей

Рис. 9. ММР активных цепей при $\tau = 0.5$

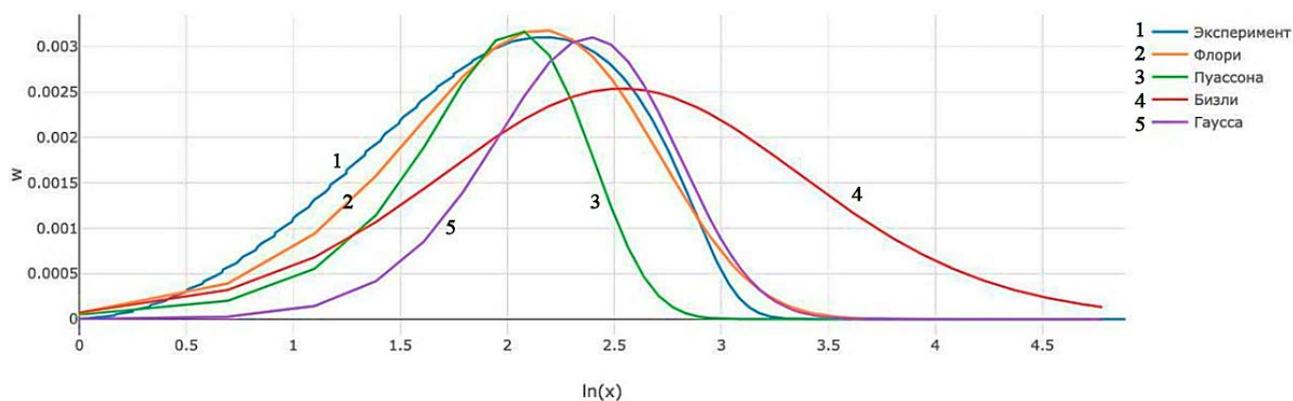
Результат вычислений для активных цепей полимера в условном момент времени $\tau = 0.5$ представлен на рис. 9 с набором распределений.

Сравнивая распределения и ММР активных цепей, нельзя однозначно сказать, к какому типу распределению относится ММР.

Наименьше отличия экспериментального вычисления с распределением Бизли.

Проведем анализ для ММР полимера активных цепей в момент времени $\tau = 0.7$.

Полученные вычисления при $\tau = 0.7$ представлены на рис. 10.

Рис. 10. ММР активных цепей при $\tau = 0.7$

Для вычисленного ММР в момент времени $\tau = 0.7$ наиболее характерным распределением является распределение Флори.

Из проведенного вычислительного эксперимента можно сделать вывод, что тип ММР полимера изменяется относительно времени. Для рассмотренного примера при условном времени $\tau \in [0.45, 0.65]$ наиболее характерно распределение Бизли, а для $\tau \in [0.7, 1)$ распределение Флори.

Заключение

Таким образом, в данной статье представлено программное обеспечение для визуализации процессов полимеризации. Рассмотрен

процесс полимеризации и описана математическая модель. Представлены основные классификации и стадии процесса полимеризации. Описан алгоритм расчета молекулярно-массового распределения полимера с переходом к условному времени. Представлены примеры работы алгоритма. Продемонстрирован пример с изображением полигональной поверхности ММР полимера и рассмотрены расчеты в определенные моменты времени.

Разработанное ПО позволяет провести анализ расчета полимера по построенной полигональной сетке полимера с изменением времени. Вносить корректировки и наглядно видеть изменения модели. Провести оценку течения процесса.

Для ответа на поставленные вопросы был проведен анализ. Из анализа следует, что для одного полимера вид распределения может отличаться в различные моменты времени. Для описанного примера, выявлены промежутки времени сохранения и изменения типа распределения.

Литература

1. Подвальный С. Л. Моделирование промышленных процессов полимеризации. М.: Химия, 1979. 256 с.
2. Белянин А. М. Разработка и реализация эффективных численных методов моделирования и полимеризации на основе метода моментов. Воронеж: ВГТУ, 2014. 117 с.
3. Подвальный С.Л., Барабанов А.В. Структурно-молекулярное моделирование непрерывных технологических процессов многоцентровой полимеризации. – Воронеж : «Научная книга», 2011. 119 с.

4. Резников К.Г., Медведев С.Н. Программное обеспечение для построения кинематических моделей // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сб. тр. Междунар. науч. конф. Воронеж, 2020. С. 492-496.

5. Резников К.Г., Медведев С.Н. Алгоритм построения полигональной сетки поверхности кинематической модели // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сб. тр. Междунар. науч. конф. Воронеж, 2022. С. 707-711.

6. Никулин Е.А. Компьютерная геометрия и алгоритмы: учебное пособие. – СПб: БХВ-Петербург, 2003. 560 с.

7. Введение – Vue.js. URL: <https://ru.vuejs.org/v2/guide/> (дата обращения: 30.12.2022)

8. GitHub – reznikovkg/nm-vue. URL: <https://github.com/reznikovkg/nm-vue> (дата обращения: 30.12.2022)

9. SciPy – SciPy documentation. URL: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/index.html> (дата обращения: 26.11.2022)

Поступила 30.12.2022; принята к публикации 17.04.2023

Информация об авторах

Резников Константин Георгиевич – аспирант кафедры автоматизированных и вычислительных систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7 (951) 564-36-44, e-mail: rkg@reznikovk.ru

Подвальный Семен Леонидович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7 (473)243-77-18, e-mail: spodvalny@yandex.ru

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR RENDERING OF POLYMERIZATION PROCESSES

K.G. Reznikov, S.L. Podvalny

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article presents the implementation of software for visualization of polymerization processes for subsequent analysis of images of molecular weight distributions of polymers in real time. The mathematical modeling of polymerization is described. The main stages of the polymerization process and methods for their classification are considered. The termination stages are presented and a typical module for the random break mechanism is considered in detail. The kinetics of random termination polymerization is described. An algorithm for calculating the molecular weight distribution of a polymer with the introduction of a conditional polymerization time has been implemented and described. A block diagram and methods for visualizing the calculated results of the algorithm are presented. Software has been developed for calculating the molecular weight distribution of the polymer and rendering the obtained data. An example of software execution with the calculation of the molecular weight distribution at certain moments of conditional time is shown. The obtained molecular weight distribution was analyzed. The results of comparison with the main distributions are described. A method for optimizing the visualization of the calculated results of the algorithm for a more detailed study of the molecular weight distribution of polymers depending on the conditional time is presented

Key words: mathematical modeling, rendering, polymerization, chemical processes, software

References

1. Podvalny S.L. “Simulation of industrial polymerization processes” (“Modelirovaniye promyshlennykh protsessov polimerizatsii”), Moscow: Himiya, 1979, 256 p.
2. Belyanin A.M. “Development and implementation of efficient numerical methods for modeling and polymerization based on the method of moments” (“Razrabotka i realizatsiya effektivnykh chislennykh metodov modelirovaniya i polimerizatsii na osnove metoda momentov”), Voronezh: VSTU, 2014, 117 p.
3. Podvalny S. L., Barabanov A.V. “Structural and molecular modeling of continuous technological processes of multicenter polymerization” (“Strukturno-molekulyarnoye modelirovaniye nepreryvnykh tekhnologicheskikh protsessov mnogotsentrovoy polimerizatsii”), Voronezh: Nauchnaya kniga, 2011, 119 p.

4. Reznikov K.G., Medvedev S.N. “Software for building kinematic models”, *Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems, 11-13 November 2019 (“Programmnoye obespecheniye dlya postroyeniya kinematischeskikh modeley”)*, *Aktualnyye problemy prikladnoy matematiki, informatiki i mekhaniki, 11-13 noyabrya 2019*, Voronezh: VSU, 2020, pp 492-496.
5. Reznikov K. G., Medvedev S.N. “Algorithm for constructing a polygonal mesh of the kinematic model surface”, *Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems, 13-15 December 2021 (Aktualnyye problemy prikladnoy matematiki, informatiki i mekhaniki, 13-15 decabrya 2021)*, Voronezh: VSU, 2021, pp 707-711.
6. Nikulin E.A. “Computing Geometry and Algorithms” (“Computernaya geometriya I algoritmy”), Saint Petersburg, BHWPetersburg, 2003. 560 p.
7. Introduction – Vue.js., available at: <https://ru.vuejs.org/v2/guide/> (access date: 30.12.2022).
8. GitHub – reznikovkg/nm-vue., available at: <https://github.com/reznikovkg/nm-vue> (access date: 30.12.2022).
9. SciPy – SciPy documentation, available at: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/index.html> (access date: 26.11.2022).

Submitted 30.12.2022; revised 17.04.2023

Information about the authors

Konstantin G. Reznikov, Postgraduate student, Department of Automated and Computing Systems Faculty, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (951) 564-36-44, e-mail: rkg@reznikovk.ru
Semyon L. Podvalny, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-18, e-mail: spodvalny@yandex.ru

ПРОБЛЕМАТИКА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.Л. Бурковский, И.Н. Волков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: дороги являются важной частью экономической составляющей страны, поэтому их строительство и эксплуатация крайне необходимы. Имеются недостатки и в качестве асфальтобетонных покрытий. Рассматриваются специфика и проблематика технологических процессов по производству и укладке асфальтобетонной смеси, а также приводится структура систем управления в дорожном строительстве. Рассматривается схема по устройству дорожного покрытия, где описывается каждый этап, а также изучаются различные факторы и проблемы, которые могут повлиять на технологический процесс и рабочие моменты. Основной характеристикой готового асфальтобетонного покрытия является коэффициент уплотнения, который в результате всех технологических процессов должен совпадать с нормативным значением. У каждого технологического этапа выделен входной и выходной контроль. Все процессы идут линейно, без завершенного предыдущего этапа нельзя начать следующий, что является одной из главных проблем. Изложенный в работе теоретический материал может быть использован для создания интеллектуальной системы по управлению технологическими процессами в дорожном строительстве. Такая система очень важна для того, чтобы значительно улучшить качество асфальтобетонного покрытия, уменьшить сроки и стоимость работ

Ключевые слова: управление, дорожное строительство, входной и выходной контроль, технологические процессы, асфальтобетонная смесь, коэффициент уплотнения, структура систем управления

Введение

Одной из главных проблем дорожной отрасли является плохое качество асфальтобетонных покрытий, а также их недостаточное количество. Недостатком является и небольшой срок службы покрытия, что обусловлено высокой разнородностью качества асфальтобетона. Низкое качество асфальтобетонных (а/б) покрытий связано с разными причинами, например, множество изменений нельзя контролировать во время транспортировки смеси [1]. Также очень нестабильны параметры при укладке и уплотнении смеси. Имеются и значительные проблемы по управлению технологическими процессами дорожного строительства, которые обозначены в статье. Дороги являются важной частью экономической составляющей страны, поэтому эта проблема очень актуальна. Данная статья носит обзорный характер и по большей степени опирается на уже имеющиеся исследования и публикации по тематике работы. Целью статьи является анализ проблем и разработка теоретических основ по построению интеллектуальной системы по управлению технологическими процессами в дорожном строительстве.

Специфика технологических процессов в строительстве асфальтобетонных покрытий

Рассмотрим технологию строительства а/б покрытий, их специфику и проблемы. Главной целью является качественное выполнение работ при минимальных затратах. Структура строительства а/б состоит из четырех технологических процессов: подготовительного, транспортно-укладки смеси, контроля при приеме покрытия. В статье обозначены технологические процессы в дорожном строительстве и показана взаимосвязь между ними. Процессы идут линейно, без предыдущей технологической операции, невозможна следующая. Главной проблемой является то, что при несоблюдении условий предыдущего процесса, невозможно сделать следующий этап.

Каждый период влияет на комплекс свойств покрытия [2]. Чтобы каждый период отвечал необходимым требованиям, важно составить правильный технологический процесс дорожного строительства. Необходим системный подход, который можно разделить на более мелкие части. Это будет являться начальным этапом к созданию интеллектуальной системы по управлению и укладке асфальтобетонной смеси.

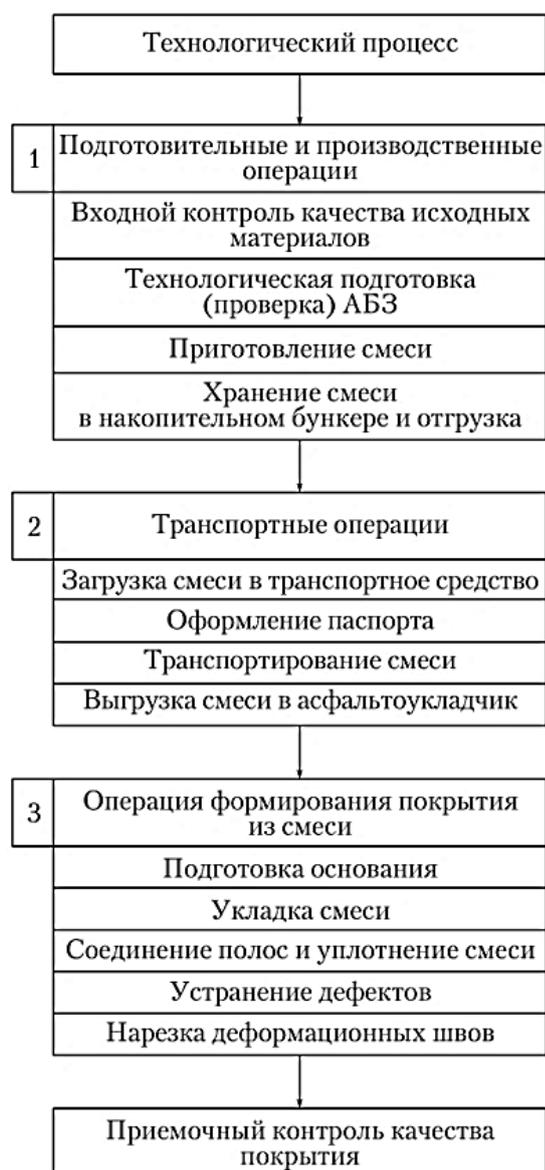


Рис. 1. Структурная схема технологического процесса строительства асфальтобетонного покрытия

На рис. 1 показан технологический процесс по укладке асфальтобетонной смеси, выделим его специфику и проблематику. Первым структурным этапом являются подготовительные работы. Проверяется качество исходных материалов согласно ГОСТ 9128-2013, а также проходит технологическая подготовка асфальтобетонного завода (АБЗ). АБЗ – это комплекс производственных сооружений, зданий, машин, предназначенных для изготовления асфальтобетонных и битумоминеральных смесей, используемых при строительстве и ремонте асфальтового покрытия. Затем готовится смесь, после чего хранится в накопительном бункере. Входным контролем является подготовка мате-

риалов, подбор состава асфальтобетонной смеси. Выходом первого этапа является готовая смесь с температурой до 160 °С. В приготовлении а/б смеси имеется множество проблем. Например, всегда нужно иметь необходимое количество материалов для приготовления а/б смеси и осуществлять контроль за их характеристиками непрерывно. Первый технологический процесс завершен, когда готовый материал поступает в автомобиль-самосвал или другую машину по перевозке смеси [3]. Вторым этапом является транспортировка готовой смеси. Сначала смесь загружается в специальные машины, где контролируется температура при каждой погрузке. При погрузке смеси в автомобиль-самосвал выписывают паспорт установленной формы. В нем отмечают вид смеси, дату и время погрузки, температуру и количество смеси. Доставка а/б смеси не должна быть более 1.5 часа, при температуре воздуха свыше 10°С. При приезде автомобиля-самосвала к месту укладки асфальтобетонной смеси смотрят присутствие товарно-транспортной накладной, дату и время отправления смеси, ее паспорт с указанием вида, типа и марки, массы и температуры, а также наличие отметки о соответствии смеси требованиям технических условий согласно ОДМ 218.3.102–2017.

Смесь осматривается визуально. Контролируется ее однородность, рыхлость. Она не должна липнуть к автомобилю. Затем производится транспортировка с выгрузкой на асфальтоукладчик [4]. Входным контролем является готовая асфальтобетонная смесь, документы и наличие необходимых дорожных машин для ее транспортировки. Выходом является наличие смеси с правильным составом и правильной температурой на дорожно-строительной площадке.

В третьем этапе сначала готовится основание, затем производится укладка смеси. Далее происходит соединение полос и уплотнение смеси. В конце устраняются все недостатки. Дефекты а/б слоев покрытия делят на два вида: связанные с техническим состоянием оснащения и вызванные характеристиками а/б смеси. При втором варианте проблему обычно устраняют внесением поправок в структуру смеси или в процесс ее приготовления, хранения и транспортирования. Некоторые дефекты могут быть связаны с оснащением и свойствами сме-

си одновременно. Недостатком является то, что выделить их в приоритетном порядке очень сложно.

Затем происходит нарезка деформационных швов. В процессе нарезки деформационных швов рекомендуется систематически контролировать соответствие получаемых геометрических размеров конструктивных элементов цементобетонных покрытий.

Входным компонентом третьего этапа является горячая смесь, достигающая температуру до 140-160 °С, а выходным – готовая дорожная одежда с заданным профилем, ровностью и коэффициентом уплотнения K_y , который представляет собой отношение полученной плотности к соответствующей стандарту плотности, найденной на стадии подбора смеси. Коэффициент уплотнения асфальтобетонной смеси находят по формуле

$$K_y = \frac{\rho_{at}}{\rho_a}, \quad (1)$$

где ρ_{at} – это средняя плотность, а ρ_a – действительная плотность образцов асфальтобетона по ГОСТ 12801-98, г/см³.

Нормативное значение K_y – это 0,95-0,99.

Входным этапом структурной системы четвертого этапа является готовая дорожная одежда. А выходным: дорога, отвечающая всем требованиям и всем стандартам.

Такие технологические процессы, как уплотнение смеси, укладка покрытий, это очень специфичный процесс из-за громадного количества причин, влияющих на всю систему. Например, на качество асфальтобетонной смеси влияют такие факторы, как разные вариации соотношения крупного заполнителя и мелкого заполнителя; производственные факторы (например, сушка песка в сушильном барабане). Также огромное влияние имеют факторы транспортировки [5]. В России у разных заводов, разные технологии производства, оборудования, а также разное нахождение месторождений. Поэтому в каждом случае разная дальность транспортировки, скорость, стоимость, а также температура смеси [6].

Главная проблема по управлению технологическими процессами состоит в том, что необходимо учитывать огромное количество

факторов, зачастую в условиях неопределенности, характеризующихся трудностью рабочего процесса.

Структура системы управления в дорожном строительстве

Различают две группы структур управления дорожным строительством: организационную и функциональную [7]. Взаимные связи между элементами определяются организационной структурой управления. Организационная структура дорожного предприятия представляет собой организационную форму, в которой осуществляется процесс управления строительным хозяйством. Она назначает взаимодействие частей подсистемы управления, их отношение; опирается на формальных связях её членов; включает информацию о содержании функционирования организации, показывающей управленческую структуру (число уровней управления и количество элементов на каждом уровне) [8]. Связи между элементами структуры могут быть вертикальными и горизонтальными. Вертикальные связи бывают линейными и функциональными.

На рис. 2 рассматривается обобщенная структура комплексной системы управления по производству и укладке асфальтобетонной смеси с пятью уровнями [9].

Система включает в себя такие технологические процессы, как производство а/б смеси, отгрузка, транспортировка, укладка, уплотнение и контроль покрытия. На каждом уровне происходит контроль параметров готового покрытия.

Главной характеристикой готового а/б покрытия является коэффициент уплотнения асфальтобетона, который в течение уплотнения изменяется. Чем больше плотность а/б смеси после прохождения асфальтоукладчика, тем ровнее асфальтобетонное покрытие. Также с этим процессом связан срок службы а/б покрытия. Важной характеристикой дорожных катков является уплотняющая способность, которая позволяет достигнуть нужного коэффициента уплотнения смеси.

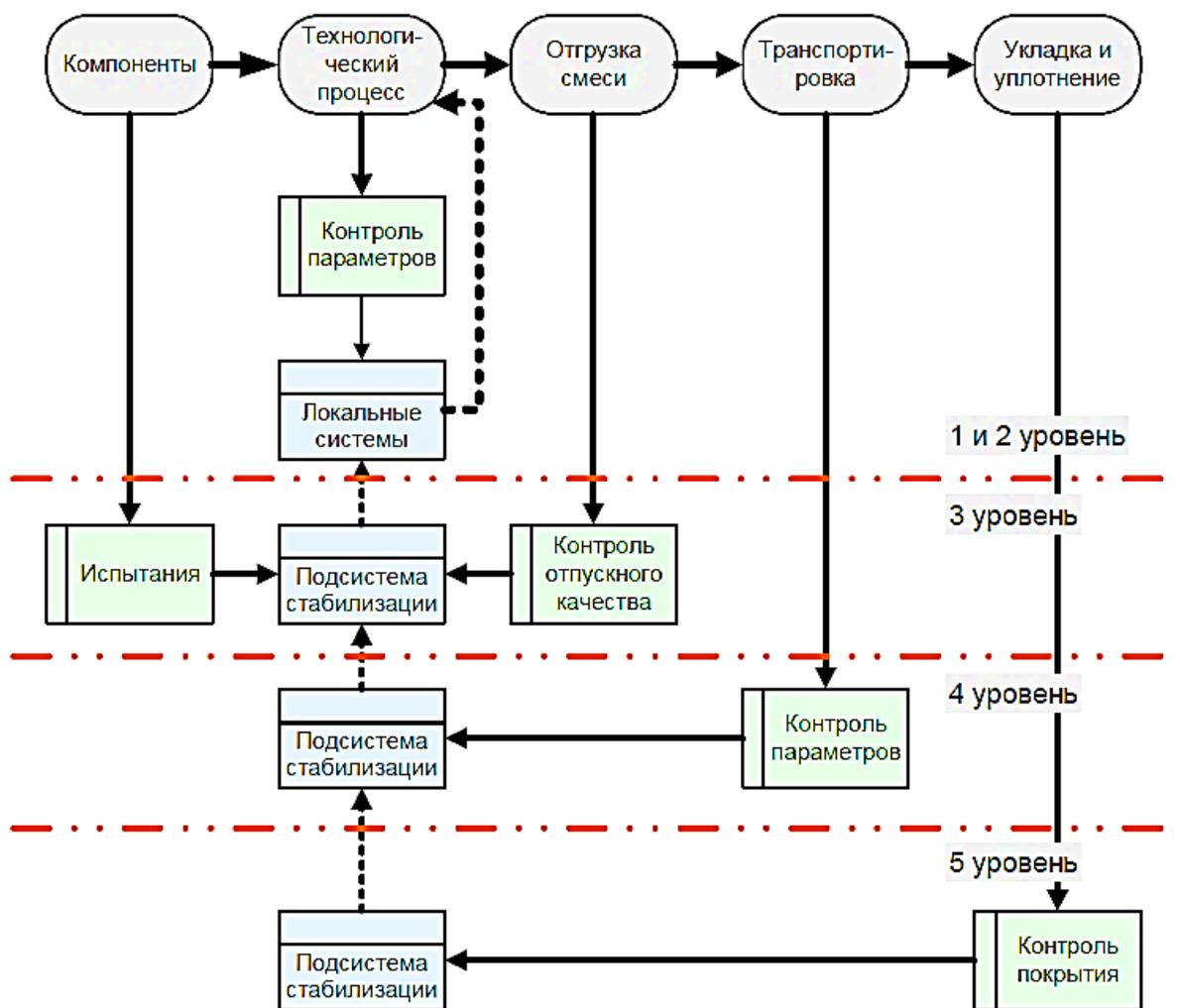


Рис. 2. Структура комплексной системы управления

Для решения этой задачи применяются такие средства, как электронный блок управления дорожно-строительной машиной путем поступления в него информации с датчиков о текущей степени уплотнения покрытия и сравнивается контролируемый параметр с заданным проектным значением. На рис. 3 приведена структурная схема расположения блоков и элементов системы автоматического управления процессом уплотнения асфальтобетонной смеси катком [10].

Также электронный блок позволяет автоматически регулировать параметры работы, чтобы было непрерывное уплотнение асфальтобетонной смесью. На асфальтоукладчике используются такие средства управления, как тензометрические датчики, датчики частоты вращения, действительной скорости, частоты вращения эксцентрикового вала, которые являются элементами подсистемы по управлению технологическими процессами дорожного строительства.

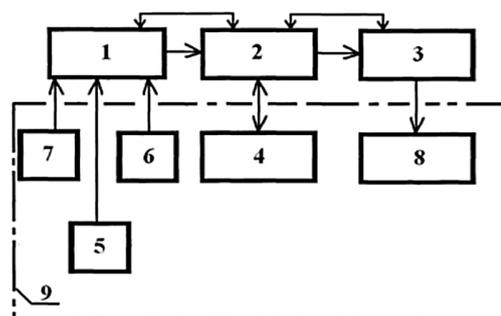


Рис. 3. Структурная схема расположения элементов и блоков системы автоматического управления процессом уплотнения асфальтобетонной смеси вибрационным катком:
 1 - устройство ввода; 2 - однокристалльный микропроцессор;
 3 - устройство вывода; 4 - блок нечеткой логики;
 5 - тензометрические датчики; 6 - датчик действительной скорости движения вибрационного катка;
 7 - датчик частоты вращения эксцентриковоговала привода уплотняющего вальца;
 8 - золотниковый исполнительный механизм;
 9 - контур подсистемы автоматического управления режимами уплотняющего вальца

Заключение

В статье приведены структура системы управления дорожным строительством и технологические процессы, а также средства управления, задействованные в них. Выделено четыре этапа и для каждого из них дан входной и выходной контроль. Изложенный в работе теоретический материал может быть использован для создания интеллектуальной системы по управлению технологическими процессами в дорожном строительстве. Создание данной интеллектуальной системы значительно сократит время и стоимость работ, а также повысит качество асфальтобетонного покрытия.

Литература

1. Борщ В.В. Автоматизация технологических процессов производства асфальтобетонных смесей для дорожного строительства с использованием ультразвуковых технологий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.В. Борщ. М., 2015. 42 с.
2. Бастрыгина А.В., Прокопьев А.П. Критерии оценки качества дорожных покрытий нежесткого типа для управления процессами уплотнения // Молодежь и наука: VII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и

молодых ученых. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2011.

3. Доценко А.И. Комплексная автоматизация производства асфальтобетонной смеси с учетом влияния факторов её транспортировки, укладки и уплотнения: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.13.06 / А.И. Доценко. М., 2005. 42 с.

4. Дорожная техника – 2011: кат.-справ. – СПб.: ООО «Славу-тич», 2011. 201 с.

5. Завьялов М.А., Завьялов А.М. Определение значения коэффициента пластичности дорожной одежды // Изв. вузов. Сер. «Строительство», 2006. № 1. С. 76–79.

6. Автоматизация технологических процессов дорожного строительства: монография / А. П. Прокопьев, В. И. Иванчура, Г. В. Кустарев, Р. Т. Емельянов. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. 245 с.

7. Ньёматилла А.Г., Навшод А.К. Модели упорядочивания структур управления систем с рассредоточенными объектами // Евразийский союз ученых, 2020. № 6-1 (75). С. 46-48.

8. Основы управления дорожным строительством URL: <https://studfile.net/preview/5761270/page:15/>

9. Пудовкин А.Н. Структура задач иерархической системы управления производством асфальтобетонной смеси // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 10. С. 270-271.

10. Шулбаева А.С. Совершенствование процесса распределения асфальтобетонной смеси: магистерская диссертация : 08.04.01 / А.С. Шулбаева. Красноярск: СФУ, 2017. 89 с.

Поступила 25.01.2023; принята к публикации 17.04.2023

Информация об авторах

Бурковский Виктор Леонидович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода, автоматизации и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.+7 (473) 243-77-20, e-mail: bvl@vorstu.ru,

Волков Иван Николаевич – аспирант кафедры электропривода, автоматизации и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7 (908)141-26-12, e-mail: ivan1900volkov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4196-5688>

PROBLEMS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES MANAGEMENT IN ROAD CONSTRUCTION

V.L. Burkovskiy, I.N. Volkov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: roads are an important part of the economic component of the country, so their construction and operation is essential. There are some disadvantages in the quality of asphalt concrete pavements. The article discusses the specifics and problems of technological processes for the production and laying of asphalt mix, and also provides the structure of control systems in road construction. A pavement scheme is considered, where each stage is described, as well as various factors and problems that can affect the technological process and working moments are studied. The main characteristic of the finished asphalt concrete pavement is the compaction coefficient, which, as a result of all technological processes, must coincide with the standard value. Each technological stage has input and output control. All processes proceed linearly, without the completed previous stage, it is impossible to start the next one, which is one of the main problems. The theoretical material presented in the work can be used to create an intelligent system for managing technological processes in road construction. Such a system is very important in order to significantly improve the quality of the asphalt concrete pavement, reduce the time and cost of work

Key words: management, road construction, incoming and outgoing control, technological processes, asphalt mix, fill factor, structure of control systems

References

1. Borshch V.V. "Automation of technological processes for the production of asphalt concrete mixes for road construction using ultrasonic technologies" ("Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva asfal'tobetonnykh smesey dlya dorozhnogo stroitel'stva s ispol'zovaniyem ul'trazvukovykh tekhnologiy"), abstract of Dr. of Tech. Sci. diss., Moscow, 2015, 42 p.
2. Bastrygina A. V. "Criteria for assessing the quality of non-rigid pavements for controlling compaction processes", *VII All-Russian conference "Youth and science" ("Molodezh' i nauka")*, 2011
3. Dotsenko A.I. "Integrated automation of the production of asphalt concrete mix, taking into account the influence of factors of its transportation, laying and compaction" ("Kompleksnaya avtomatizatsiya proizvodstva asfal'tobeton-noy smesi s ucheto vliyaniya faktorov yeyo transportirovki, ukladki i uplotneniya"), abstract of Dr. of Tech. Sci. diss., Moscow, 2005, 42 p.
4. "Road equipment" ("Dorozhnaya tekhnika") 2011, cat.-ref. ,St. Petersburg: Slavutich, 2011, 201 p.
5. Zavyalov M.A., Zavyalov A.M. "Determination of the value of the coefficient of plasticity of pavement", *Proceedings of higher educational institutions. Building (Izv. vuzov. Ser. Stroitel'stvo)*, 2006, no. 1, pp. 76–79.
6. Prokopiev A.P., Ivanchura V.I., Kustarev G.V., Emelyanov R.T. "Automation of technological processes of road construction" ("Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov dorozhnogo stroitel'stva"), Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2013, 245 p.
7. Nematilla A.G., Navshod A.K. "Models for ordering control structures of systems with dispersed objects", *Eurasian Union of Scientists (Yevraziyskiy soyuz uchenykh)*, 2020, no. 6-1 (75), pp. 46-48.
8. "Fundamentals of Road Construction Management" ("Osnovy upravleniya dorozhnym stroitel'stvom"), pp. 115-118, available at: <https://studfile.net/preview/5761270/page:15/>
9. Pudovkin A.N. "The structure of the task of the hierarchical control system for the production of asphalt concrete mix", *The Bulletin of the Orenburg State University (Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2011, no 10, pp. 270–271.
10. Shulbaeva A.S. "Improving the process of distribution of asphalt concrete mixture" ("Sovershenstvovaniye protsessa raspredeleniya asfal'tobe-tonnoy smesi"), Master's diss, Krasnoyarsk: SFU, 2017, 89 p.

Submitted 25.01.2023; revised 17.04.2023

Information about the authors

Victor L. Burkovsky, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473) 243-77-20, e-mail: bvl@vorstu.ru

Ivan N. Volkov—graduate student of the department of electric drive, automation and control in technical systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (908) 141-26-12, e-mail: ivan1900volkov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4196-5688>

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕШТАТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ И ЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА БАЗЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ANY LOGIC

Р.С. Дударев^{1,2}, М.И. Чижов¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Нововоронежская АЭС-2, г. Нововоронеж, Россия

Аннотация: рассматривается исследование нестабильной работы энергоблока атомной электрической станции, заключающейся в возникновении явления резонанса ввиду некорректно работающей программы управления электромагнитными клапанами системы автоматизированного управления турбоагрегата, которые при штатной эксплуатации обязаны корректно изменять электрическую и тепловую нагрузку, а также корректно регулировать и моделировать выработку энергии при отказе одного из регуляторов подачи пара на турбину. Проведенное исследование системы регулирования выявило отклонение характеристик сервомоторов по электрической части, вследствие чего рекомендуется для точного определения причины повышенной нечувствительности по давлению на золотнике выполнить ревизию сервомоторов, а также модернизировать программу управления данной системой. Невыполнение указанных действий может повлечь за собой аварийный сброс нагрузки, вследствие чего система не удержит машину на частоте вращения ниже уставки срабатывания автомата безопасности, что может привести к разрушению турбоагрегата. Система управления турбиной – это закольцованная система. В случае, если турбоагрегат применяется для приведения ротора в движение с постоянной скоростью, контроллер показывает скорость вала, сравнивает фактическую скорость с назначенной уставкой. В том случае, когда есть разница между фактической скоростью и желаемой скоростью, контроллер направляет сигнал приводу, управляющему паровым клапаном, который будет изменять параметры до тех пор, пока они снова не будут синхронизированы

Ключевые слова: атомная электростанция, энергоблок, реактор, турбина, система управления, моделирование, оптимизация, генератор, регулирующий клапан

Введение

Система автоматического регулирования турбины, используемая на атомных электрических станциях, должна устойчиво выдерживать заданную электрическую и тепловую нагрузку, а также обеспечивать возможность их плавного регулирования. Установка регулирования турбины непременно должна подходить по всем высоким стандартам безопасности при эксплуатации атомных электрических станций [1]. В зависимости от условий эксплуатации, турбоустановка вынуждена работать в далее идущих режимах – как одновременно, так и отдельно с многими потребителями по электрической и тепловой нагрузке. Еще одной важной задачей системы управления имеется возможность плавного поднятия или плавного снижения электрической и тепловой нагрузки.

Главной проблемой этих систем является большая нечувствительность механической части, вследствие чего приводит систему к значительным изменениям нагрузки и некорректной работе энергоблока в целом [2]. Но также к неплавным колебаниям нагрузки приводят дефекты, такие как закусывание штоков, подви-

жение клапанов, сервомоторов, а также избыточной вибрации трубоной системы.

Немаловажной частью системы регулирования паровой турбины является программа управления электромеханическими клапанами [3]. В данной статье рассматривается такая проблема, как вхождение системы в резонанс, а именно – нестабильная работа системы регулирования паровой турбины на Нововоронежской АЭС-2, энергоблок номер 2.

Устройство и принцип работы системы

Автоматизированная система регулирования и защиты в целом предназначена для:

- автоматического поддержания частоты вращения ротора турбоагрегата в соответствии с требованиями при нагрузке турбины, работе на холостом ходу, работа генератора с сетью и работа на изолированную от сети нагрузку;
- изменения электрической нагрузки при работе генератора в сети в соответствии с заданием, получаемым от пользователя и из системы автоматического управления АЭС;
- участия в специальном первичном регулировании частоты сети, согласно требованиям специальных документов эксплуатации энергосистемы;

- задание уставки определенного давления пара перед регулирующими клапанами высокого давления;
- предупреждение критического повышения частоты вращения ротора турбины при полном или частичном сбросах нагрузки;
- обеспечения работоспособности турбины в режиме нагрузки собственных нужд и холодного хода;
- защиты турбоагрегата путем прекращения подачи в него пара в случае возникновения недопустимых режимов работы;
- предотвращения недопустимого понижения давления свежего пара;
- стремительной ограниченной по времени разгрузки турбоагрегата и долгосрочного ограничения мощности по сигналам автоматики энергосистемы [4].

Система маслоснабжения регулирования необходима для [5,6]:

- подачи некоторого количества огнестойкой жидкости к гидравлической части системы при настройке блока к пуску и при нормальной работе машины;
- подачи огнестойкой жидкости к гидравлической части системы от грузовых аккумуляторов в случае кратковременного отсутствия параметров собственных нужд или перехода агрегатов регулирования;
- поддержания температуры масла в определенных пределах;
- осуществление механического очищения огнестойкой жидкости, удаление растворенного в масле воздуха, удаления воды с поверхности масла в специальной емкости системы;
- минимизация прорывания масляных выделений в цех.

Основное исследование внезапного возникновения явления резонанса системы регулирования турбоагрегата

В изучения причин нестабильной работы энергоблока НВАЭС была проверена механическая часть системы и электрогидравлических преобразователей-сумматоров, по которой не обнаружено никаких неисправностей. Эксплуатирующим персоналом энергоблока были приняты по нормализации работы системы, данные движения не смогли поспособствовать решению данной проблемы. В ходе детальной проработки был произведен тщательный осмотр всей системы регулирования. Критики по целостности конструкции не нашлось, насосный агрегат выдавал заявленные показатели, техни-

ческая жидкость соответствовала требованиям нормативной документации (после химического анализа).

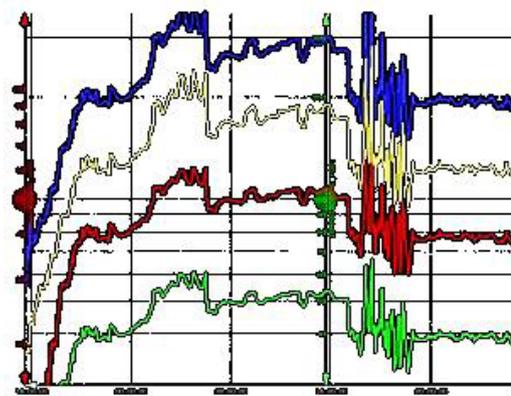


Рис. 1. График зависимости давления масла на регулирующие клапаны высокого давления от времени

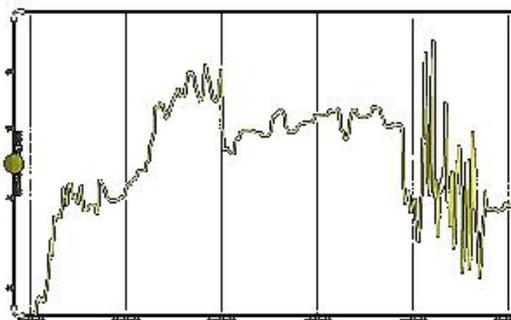


Рис. 2. Зависимость давления масла на один регулирующий клапан высокого давления от времени

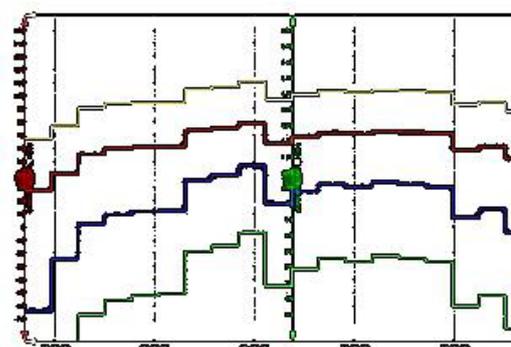


Рис. 3. График зависимости силы тока электромагнитных клапанов от времени

Впоследствии стало понятно, что истинная причина возникновения резонанса кроется в некорректно работающей программе управления системой регулирования. После возникновения данной гипотезы были исследованы графики работы сумматоров и клапанов высокого давления. На рис. 1 представлен график отношения давления масла на регулирующие кла-

паны высокого давления от времени. На рис. 2 представлен график отношения давления масла на один регулирующий клапан высокого давления от времени. На рис. 3 представлен график зависимости силы тока электромагнитных клапанов от времени. На рис. 4 представлен график отношения силы тока электромагнитного клапана от времени.

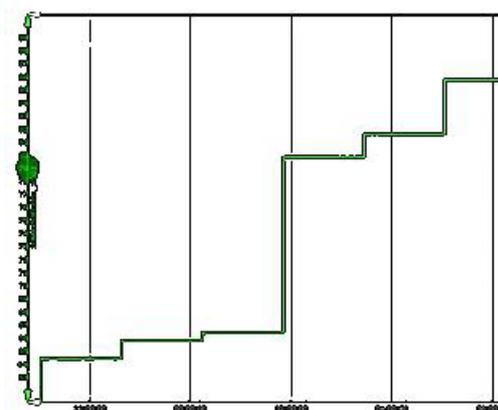


Рис. 4. График зависимости силы тока одного электромагнитного клапана от времени

Как видно из графиков, клапаны работают не плавно, вследствие чего нарушается нормальная эксплуатация энергоблока, что в свою очередь приводит к снижению мощности электрогенератора, долгосрочная эксплуатация блока в данном режиме невозможна ввиду возможности механического разрушения трубопроводов и элементов системы.

Моделирование работы АЭС в Any Logic

Данная модель основана на принципиальной схеме работы АЭС (рис. 5). В неё заложены данные, полученные в ходе непосредственной эксплуатации энергоблоков НВАЭС-2.

В данном модуле (рис. 6) имеется возможность задание мощность энергоблока, дополнение и исключение из системы определённых единиц оборудования. Имеем возможность задавать конкретные параметры для регулирующих клапанов подачи пара на турбину, выводить зависимости положения клапана от электрической нагрузки генератора. Генерировать нештатную эксплуатацию комплекса изменения нагрузки парового турбоагрегата. Проводить теоретические эксперименты, заключающиеся в адаптации оборудования в процессе изменения нагрузки на реакторе.

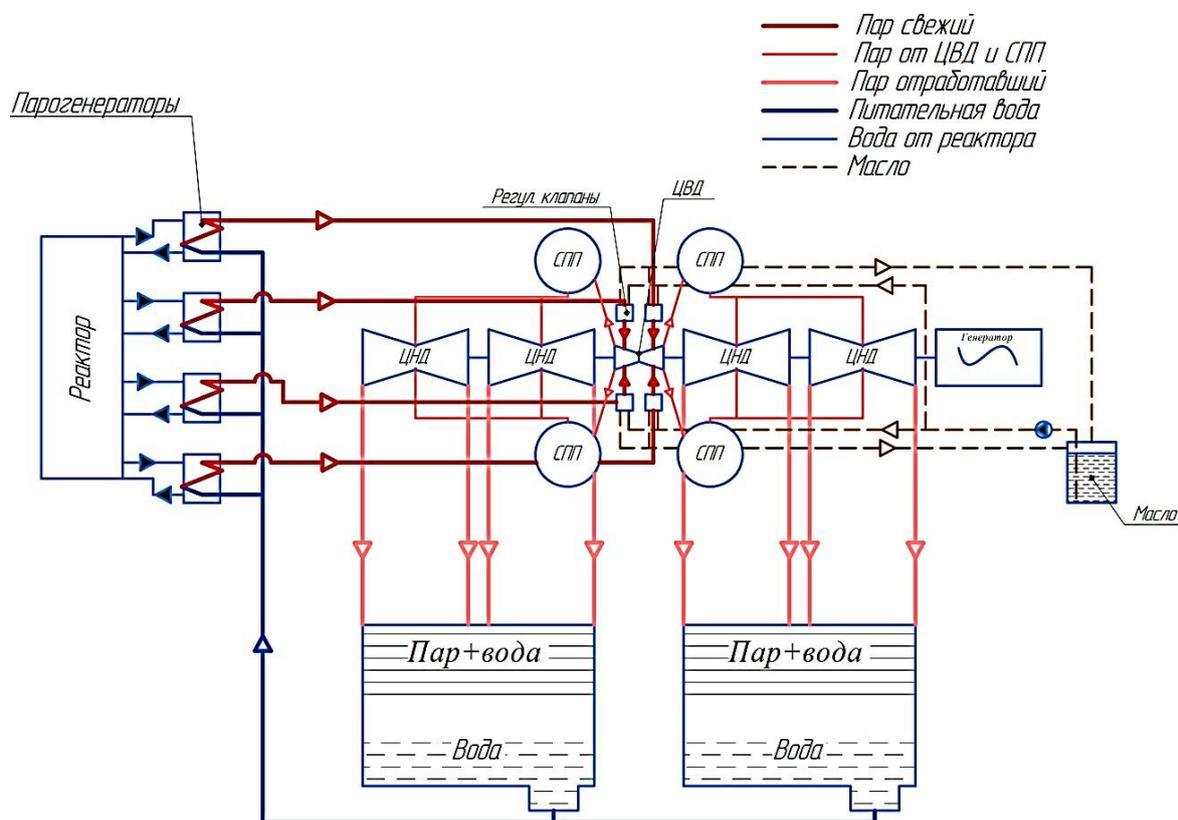


Рис. 5. Принципиальная схема работы энергоблока АЭС

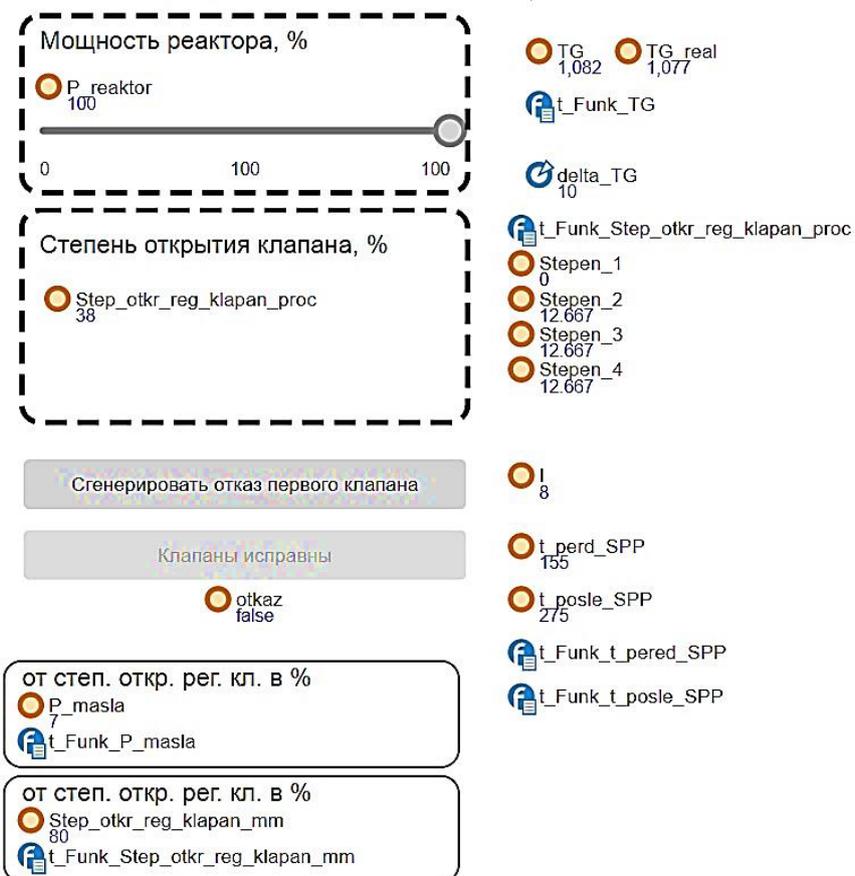


Рис. 6. Панель задачи параметров работы энергоблока в Any Logic

Схема **Параметры** **Графики**

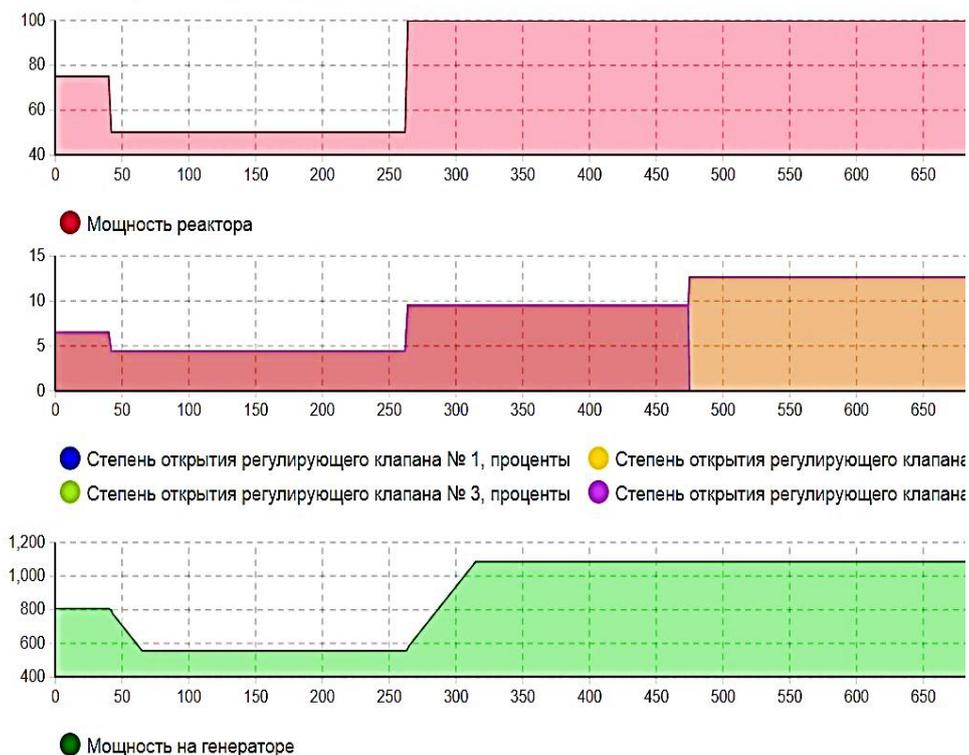


Рис. 7. Графики зависимостей положения клапанов и мощности генератора от нейтронной мощности реактора

На данных графиках (рис. 7) показаны зависимости выработки энергии генератора от мощности реактора. Как видно из представленных зависимостей, при закрытии одного из клапанов подачи пара на турбину, электрическая нагрузка изменилась несущественно. На основании чего можно сделать вывод, что теоретически данное оборудование может эксплуатироваться на трёх из четырёх клапанов. Основываясь на практическом опыте эксплуатации, можно уверенно заявить, что долгосрочная эксплуатация в данном режиме не возможна. Но для проведения ремонтных работ на клапане кратковременная работа в данном режиме вполне возможна.

Заключение

В результате проведенных исследований была создана модель работы энергоблока АЭС на базе Any Logic. Данная модель описывает работу второго контура НВАЭС2 с некоторыми упрощениями. С помощью данной модели можно визуализировать зависимость выработки электроэнергии от положения регулирующих клапанов. Есть возможность увидеть параметры работы энергоблока при выведенном в ремонт оборудовании, например, ремонт одного из регулирующих клапанов. Так же данная модель позволяет численно показать зависимость конечной выработки от состояния оборудования.

Поступила 12.02.2023; принята к публикации 17.04.2023

Информация об авторах

Дударев Роман Сергеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); инженер 1 категории по эксплуатации гидротехнических сооружений и башенной испарительной градирни, Нововоронежская АЭС-2 (396070, Россия, г. Нововоронеж, промышленная зона Южная, 1), тел. 8-920-404-09-70, e-mail: romandud111@gmail.com

Чижов Михаил Иванович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); e-mail: mihail@list.ru

STUDY OF EMERGENCY OPERATION OF A STEAM TURBINE CONTROL SYSTEM AND ITS SIMULATION BASED ON ANY LOGIC CAPABILITIES

R.S. Dudarev^{1,2}, M.I. Chizhov¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Novovoronezh NPP-2, Novovoronezh, Russia

Abstract: the article discusses the study of the unstable operation of the power unit of a nuclear power plant, which consists in the occurrence of a resonance phenomenon due to an incorrectly operating program for controlling the electromagnetic valves of the automatic control system of the turbine, which, during normal operation, must steadily regulate the given electrical and thermal load, and also provide the possibility of their correct regulation, and simulation of power generation, as well as the failure of one of the steam supply valves to the turbine. The study of the control system revealed a deviation in the characteristics of the servomotors in terms of the electrical part, as a result of which it is recommended to accurately determine the

Литература

1. Инструкция по эксплуатации программно-технического комплекса электронной части системы управления турбины энергоблока № 6 НВАЭС-2. Филиал АО "Концерн Росэнергоатом" – Нововоронежская АЭС. 2017. С. 5-30.
2. Опыт проектирования и внедрения системы верхнего блочного уровня АСУ ТП АЭС / М.Е. Бывайков, Е.Ф. Жарко, Н.Э. Менгазетдинов, А.Г. Полетыкин, И.В. Прангишвили // Автоматика и телемеханика. 2006. Вып. 5. С. 65-79.
3. Терехов Д.В., Сидоренко Е.В., Данилов А.Д. Тенденции развития АСУ ТП на Нововоронежской АЭС // Безопасность, надежность и диагностика ЯЭУ. 2017. С. 66-76.
4. Novoselov V.B. Research and optimization of parameters of electrohydraulic steam turbine regulation // Heat power engineering. 2009. P. 32-37.
5. Modernization of electrohydraulic following drive of steam turbine control system k-1000-60/1500 / T.G. Zatzarinaya, A.A. Skidan, A.A. Chuklin, K.P. Anikevich, A.N. Melnik // Power plants and technologies. 2015. P. 11-17.
6. Research and calculation of the parameters of the elements of the turbine rotor speed control system taking into account the parametric uncertainty of the mathematical model / Yu.P. Korniyushin, D.V. Melnikov, N.D. Egupov, P.Yu. Korniyushin // Bulletin of the Moscow State Technical University named after N E Bauman. Series Natural Sciences. 2014. P. 78-93.

cause of increased pressure insensitivity on the spool to perform an audit of the servomotors, as well as to modernize the control program for this system. Failure to perform these actions may lead to a load shedding situation, in which the control system will not keep the turbine at a speed below the safety switch setting, which may lead to the destruction of the turbine set

Key words: nuclear power plant, power unit, reactor, turbine, control system, modeling, optimization, generator, control valve

References

1. "Operating instructions for the software and hardware complex of the electronic part of the turbine control system of power unit No. 6 NVNPP-2", Branch of Rosenergoatom Concern JSC - Novovoronezh NPP (Filial AO "Kontsern Rosenergoatom" – Novovoronezhskaya AES), 2017, pp. 5-30.
2. Byvaikov M.E. et al. "Experience in designing and implementing the system of the upper block level of automated process control systems for nuclear power plants", *Automation and telemekhanics (Avtomatika i telemekhanika)*, 2006, vol. 5, pp. 65-79.
3. Terekhov D.V., Sidorenko E.V., Danilov A.D. "Trends in the development of automated process control systems at the Novovoronezh NPP", *Safety, reliability and diagnostics of nuclear power plants (Bezopasnost', nadezhnost' i diagnostika YAEU)*, 2017, pp. 66-76.
4. Novoselov V.B. "Research and optimization of parameters of electrohydraulic steam turbine regulation", *Heat power engineering (Teploenergetika)*, 2009, pp. 32-37.
5. Zatzarinnaya T.G. et al. "Modernization of electrohydraulic following drive of steam turbine control system k-1000-60/1500", *Power plants and technologies (Energeticheskiye ustanovki i tekhnologii)*, 2015, pp. 11-17.
6. Kornushin Yu.P. "Research and calculation of the parameters of the elements of the turbine rotor speed control system taking into account the parametric uncertainty of the mathematical model", *Bulletin of the Moscow State Technical University named after N E Bauman. Series Natural Sciences (Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N. E. Baumana. Seriya Yestestvennyye nauki)*, 2014, pp. 78-93.

Submitted 12.02.2023; revised 17.04.2023

Information about the authors

Roman S. Dudarev, Post-graduate student, Department of KITP Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), engineer of the 1st category for the operation of hydraulic structures and an evaporative cooling tower, Novovoronezh NPP-2 (1 Yuzhnaya industrialnaya zona, Novovoronezh 396070, Voronezh oblast, Russia), tel. 8-920-404-09-70, e-mail: romandud111@gmail.com

Mikhail I. Chizhov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Department of KITP Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: mihailc@list.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЁРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

М.А. Лихотин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлена классификация трёх разновидностей опухолей мозга: менингиома, глиома и опухоль гипофиза по магнитно-резонансной томографии (МРТ). В исследовании основным инструментом для классификации являются свёрточные нейронные сети. Приводятся постановка задачи, количество исходных изображений, разбиение входной выборки на обучаемую, тестовую и валидационную, нормализация входного набора данных и прочее. Приведено описание архитектуры свёрточной нейронной сети, которая используется для обучения модели классификации изображений опухоли мозга. В ней применяется заранее предобученная нейронная сеть EfficientNetB3, которая была обучена за счёт сервиса ImageNet, что является иерархически организованной базой данных изображений. Представлена архитектура свёрточной нейронной сети EfficientNetB3, где по цепочке продемонстрирована взаимосвязь между слоями. Рассматривается детализированный пример обучения приведённой свёрточной нейронной сети, где продемонстрировано, как происходит улучшение работы модели на тестовых и валидационных выборках в зависимости от количества эпох. Представлена сводная статистика при обучении, где выявлена эпоха с наилучшим результатом работы модели на валидационной выборке, что и является результатом обучения

Ключевые слова: свёрточная нейронная сеть, опухоль мозга, классификация, архитектура, обучение

Введение

Развитие машинного обучения всё больше проникает в различные технологические сферы общества, такие как ядерная физика, астрономия, геология, экономика, управление, автоматика и т.д. В представленных выше направлениях можно выделить следующие типовые задачи, которые хорошо решаются методами машинного обучения, такие как предсказания временных рядов, классификации, кластеризации, уменьшение размерности и т.д.

В работе применяется одна из группы моделей свёрточной нейронной сети EfficientNet, которые достигли высокой точности в базе данных ImageNet с очень небольшим количеством параметров по сравнению с другими моделями. EfficientNet состоит из 8 моделей B0-B7, чем выше номер в префиксе, тем и выше точность такой модели и соответственно количество параметров [1]. В работе [2] представлена система оценки возраста в группах. Была выявлена лучшая модель из группы EfficientNet и продемонстрировано что её использование для задачи классификации, экономит время обучения и вычислительные ресурсы, обеспечивая при этом хорошую точность.

В рамках данного исследования представлена работа по решению задачи классификации в области диагностирования опухолей мозга. Есть набор данных с тремя различными заболе-

ваниями: менингиома, глиома, и опухоль гипофиза [3].

В литературе можно найти много исследований связанных с работой диагностики опухолей мозга, например в [4, 5]. Но большинство работ не учитывает положение головы в МРТ изображении, что может влиять на обобщающую способность нейронной сети. Главной целью для решения такой проблемы является организация нескольких нейронных сетей, каждая из которых будет специализироваться на своём положении: вид сверху, сбоку, сзади (спереди). В рамках данной работы представлено исследование обучения пока только одного положения головы (вид сбоку).

Постановка задачи

Необходимо построить модель искусственной нейронной сети, которая при подаче изображения на свой вход выдаст на выходе метку, соответствующую предопределённому типу опухоли.

Исходные данные содержат 3064 изображения головного мозга с повышенной контрастностью от 233 пациентов, среди которых менингиома – 708, глиома – 1426 и опухоли гипофиза – 930.

Предварительная обработка данных

На рис. 1 продемонстрирован пример изображения опухоли гипофиза.

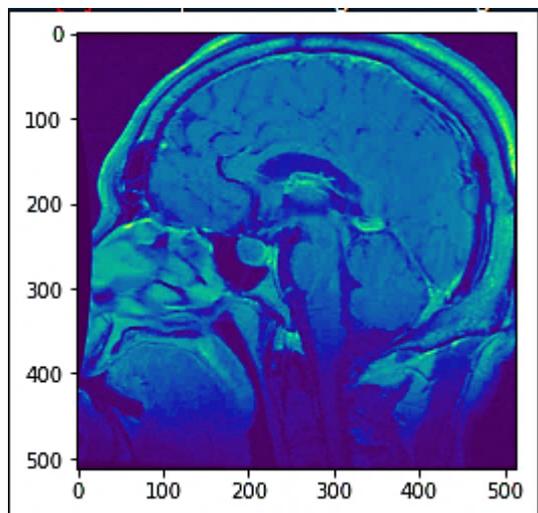


Рис. 1. Пример обучаемой выборки

После того как данные были загружены была произведена разметка данных по необхо-

димым классам: менингиомы, глиомы, и опухоли гипофиза.

Вся исходная выборка была разбита на несколько частей и случайно перемешана, чтобы во время обучения модель не обучалась по порядку следования меток, а запоминала одновременно 3 класса. Большая часть выборки, которая составляет 90 %, предназначена для обучения нейронной сети, а оставшаяся была разделена ещё раз пополам: валидационную и тестовую выборку. Первая, соответственно, нацелена на мониторинг ошибок и метрик во время обучения в конце каждой эпохи, а другая предназначена для теста полученной модели после обучения.

Если переводить в количественную оценку, то обучаемая выборка содержит 2757 значений, валидационная состоит из 154, а тестовая из 153.

Но если детальнее проанализировать обучаемую выборку, то будет замечено, что изображений менингиомы равно 645, глиомы 1269, а опухоли гипофиза 843. На рис. 2 изображена столбчатая диаграмма распределения количества изображений.

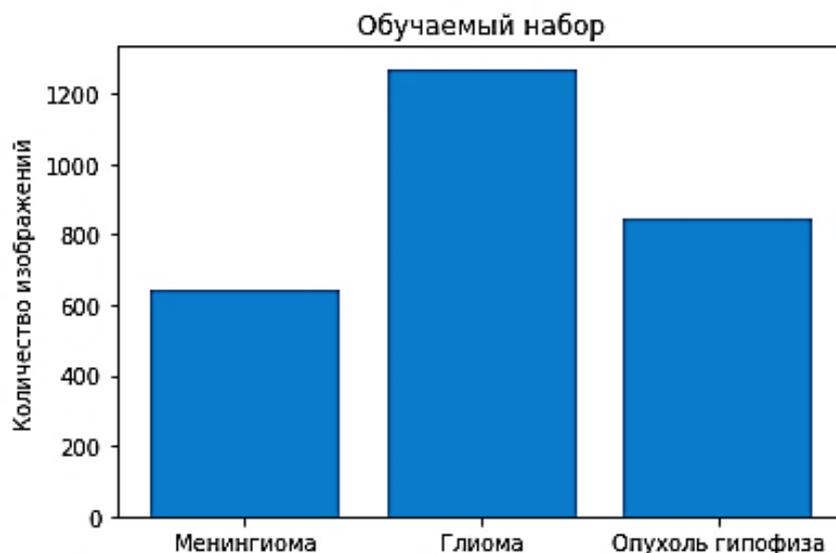


Рис. 2. Количество изображений в обучающем наборе данных

Такой перекося значений может повлиять на обобщающую способность нейронной сети. Необходимо нормализовать значения, т.к. 645 – минимальное количество изображений, то и остальные классы изображений нужно подогнать под это число.

Архитектура нейронной сети

Обучение модели будет происходить за счёт предобученной нейронной сети EfficientNetB3. Заранее изученные особенности могут быть полезными для решения многих проблем в сфере компьютерного зрения, даже если эта предобученная классификация не совсем актуальна для решения текущей задачи.

Например, можно обучить сеть по ImageNet (иерархически организованная база данных изображений), где классами в основном являются животные и предметы повседневного обихода, а затем переиспользовать эту обученную сеть для чего-то совершенно другого, например,

в нашем случае идентификация нескольких разновидностей опухолей мозга.

На рис. 3 продемонстрирована архитектура нейронной сети EfficientNetB3 [6].

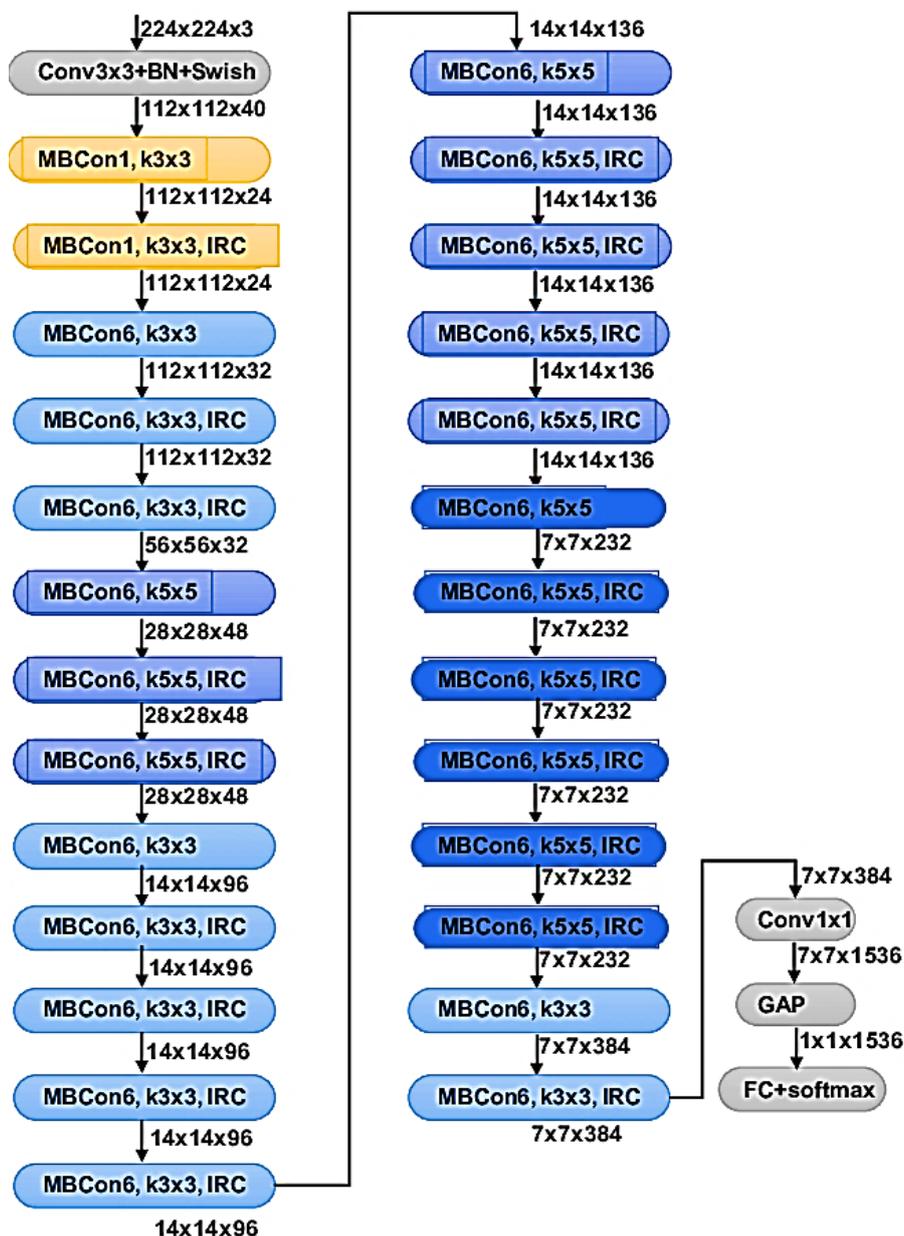


Рис. 3. Архитектура свёрточной нейронной сети EfficientNetB3

На выходе такой предобученной модели будут располагаться следующие слои:

- слой Batch Normalization, предназначенный для ускорения обучения нейронной сети [7];
- полносвязный слой, чей выход состоит из 256 нейронов и активационной функцией relu;

- так называемый Dense слой, который случайно обнуляет определённое количество значений на предыдущем выходном слое и предназначен для предотвращения переобучения модели;
- заключительный выходной слой, состоящий из 3 нейронов, которые и будут определять класс, к которому относится вход-

ное изображение. Активационная функция softmax.

Обучение и результаты работы нейронной сети

В процессе обучения выяснилось, что на большом количестве порции данных в опреде-

лённый момент может не хватить видеопамати, поэтому пришлось брать по 10 изображений на каждую эпоху, что увеличивает общее количество итераций обучения и растягивает соответственно время.

Процесс обучения сведён в таблицу ниже.

Процесс обучения нейронной сети

Номер эпохи	Потери при обучении	Точность при обучении	Потери при валидации	Точность при валидации	Продолжительность обучения (с.)
1	7,42	76.792	6.17975	86.275	271.70
2	5,291	88.345	4.65172	92.810	255.06
3	3,962	92.109	3.44448	94.118	255.46
4	3,035	94.327	2.74748	91.503	253.66
5	2,296	95.874	1.96828	96.078	248.61
6	1,756	96.545	1.51652	98.039	250.70
7	1,340	97.009	1.17514	98.693	250.44
8	1,077	96.287	0.92113	98.039	249.91
9	0,840	97.473	0.77479	96.732	250.35
10	0,676	97.782	0.57912	99.346	251.68
11	0,548	98.453	0.53723	97.386	249.75
12	0,481	97.834	0.43813	98.693	249.54
13	0,373	99.278	0.35224	98.693	249.71
14	0,318	99.330	0.32049	97.386	248.93
15	0,277	99.123	0.25665	98.693	247.81
16	0,246	99.175	0.28618	97.386	251.26
17	0,240	99.433	0.22146	98.693	256.15
18	0,217	99.742	0.22544	97.386	253.49
19	0,221	99.691	0.21911	98.039	250.24
20	0,207	99.794	0.22406	97.386	249.67
21	0,211	99.845	0.22717	98.039	249.74
22	0,211	99.742	0.21857	97.386	250.39
23	0,206	99.794	0.21976	97.386	250.71
24	0,212	99.587	0.21820	98.039	251.87
25	0,206	99.845	0.21758	97.386	250.31
26	0,202	99.897	0.21500	98.039	250.50
27	0,201	99.897	0.21618	98.039	250.38
28	0,206	99.742	0.21517	98.039	255.91
29	0,201	99.948	0.21626	98.039	250.89

Обучение было остановлено на 29 эпохе, т.к. наименьший показатель потери при валидации последние 3 итерации показывал хуже

результат, чем на 26 эпохе [8]. Всего модель обучалась 2 часа и 10 минут.

На рис. 4 продемонстрированы графики точности и потерь при обучении.

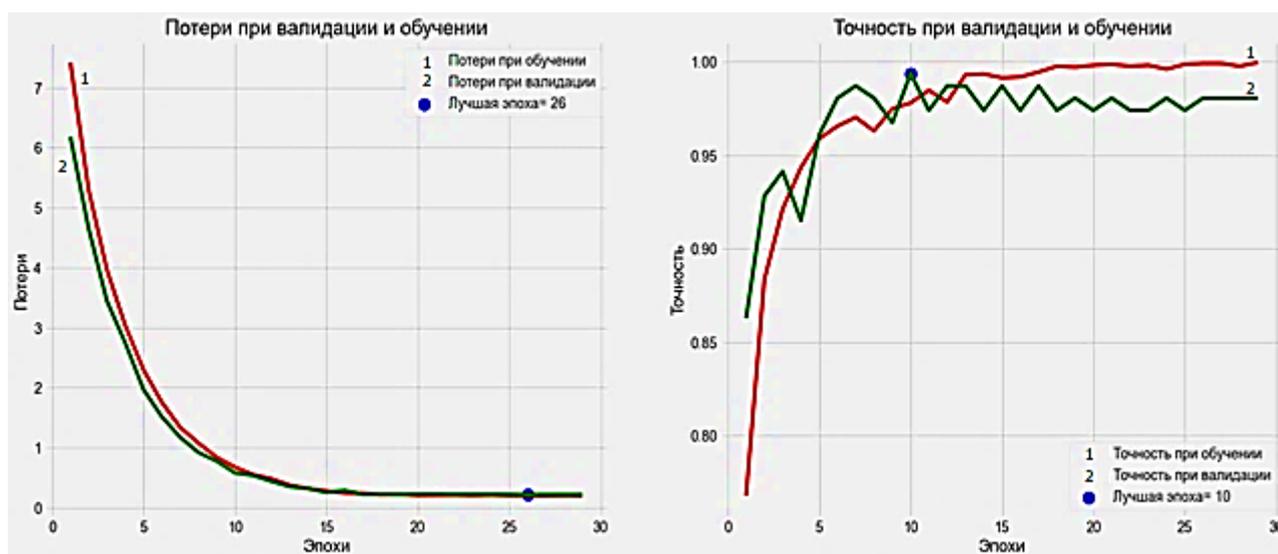


Рис. 4. Потери и точность при валидации и обучении

В итоге была получена модель, веса которой были настроены как на 26 эпохе и на тестовой выборке был получен результат в 96 %.

Заключение

В данной исследовании была продемонстрирована работа по классификации изображений опухолей мозга. Был произведен анализ и нормализация имеющихся данных и представлена архитектура нейронной сети и процесс её обучения.

Полученная модель показала результат в 96%. Можно предположить, что нейронная сеть могла переобучиться и необходимо проверить модель на большем количестве подобных изображений.

Также на данном этапе разработан только скрипт для обучения и тестирования полученных после обучения весов сети. Далее если модель после испытания на других выборках покажет не хуже результат, то можно будет организовать библиотеку для внедрения в уже существующие медицинские системы. Например, как для студентов для практики, так и для врачей-специалистов, если полученная система зарекомендует себя.

Литература

1. Tan M, Le Q. Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In: International conference on machine learning 2019 May 24. Pp. 6105-6114. PMLR.
2. Aruleba I., Viriri S. Deep Learning for Age Estimation Using EfficientNet. In: Rojas, I., Joya, G., Català, A. (eds) Advances in Computational Intelligence. IWANN 2021. Lecture Notes in Computer Science. vol 12861. Springer. Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85030-2_34.
3. Джун Ченг Набор данных опухоли головного мозга. URL: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.1512427.v5>.
4. Alqudah, Ali Mohammad, Hiam Alquraan, Isam Abu Qasmieh, Amin Alqudah, and Wafaa Al-Sharu. "Brain tumor classification using deep learning technique--a comparison between cropped, uncropped, and segmented lesion images with different sizes." arXiv preprint arXiv:2001.08844 (2020).
5. Chatterjee, S., Nizamani, F.A., Nürnbergger, A. et al. Classification of brain tumours in MR images using deep spatiotemporal models. Sci Rep 12, 1505 (2022). URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05572-6>.
6. H. Alhichri, A. S. Alswayed, Y. Bazi, N. Ammour and N. A. Alajlan, "Classification of Remote Sensing Images Using EfficientNet-B3 CNN Model With Attention," in IEEE Access. 2021. vol. 9. Pp. 14078-14094, URL: doi: 10.1109/ACCESS.2021.3051085.
7. Batch Normalization (батч-нормализация) что это такое? URL: https://proproprogs.ru/neural_network/batch-normalization-batch-normalizaciya-chto-eto-takoe.
8. Stop training when a monitored metric has stopped improving. URL: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/callbacks/EarlyStopping.

Поступила 02.02.2023; принята к публикации 13.04.2023

Информация об авторах

Лихотин Максим Андреевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: maximus-lihotin@mail.ru

USE OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FOR PREDICTION OF BRAIN TUMORS

M.A. Likhotin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this paper provides an opportunity to classify three types of brain tumors: meningioma, glioma and pituitary tumor by magnetic resonance imaging (MRI). In the study, convolutional neural networks are the main tool for classification. The paper provides a statement of the problem, the number of source images, splitting the input sample into trainable, test and validation, normalization of the input data set, and so on. The paper also describes the architecture of a convolutional neural network, which is used to train a brain tumor image classification model. It uses a pre-trained neural network EfficientNetB3, which was trained at the expense of the ImageNet service, which is a hierarchically organized image database. This study also presents the architecture of the EfficientNetB3 convolutional neural network, where the relationship between the layers is demonstrated along the chain. A detailed example of training a reduced convolutional neural network is considered, which demonstrates how the model improves on test and validation sets depending on the number of epochs. The summary statistics during training is also presented, where the epoch with the best result of the model on the validation set was identified, which is the result of training

Key words: convolutional neural network, brain tumor, classification, architecture, learning

References

1. Tan M, Le Q. "Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks", *In International conference on machine learning 2019 May 24 (pp. 6105-6114)*, PMLR.
2. Aruleba, I., Viriri, S. (2021). "Deep Learning for Age Estimation Using EfficientNet", in: Rojas, I., Joya, G., Català, A. (eds) "Advances in Computational Intelligence", IWANN 2021, "Lecture Notes in Computer Science", vol. 12861, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85030-2_34.
3. Jun Cheng "Brain tumor data set" [Electronic resource], URL: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.1512427.v5>.
4. Alqudah, Ali Mohammad, Hiam Alquraan, Isam Abu Qasmieh, Amin Alqudah, Wafaa Al-Sharu. "Brain tumor classification using deep learning technique--a comparison between cropped, uncropped, and segmented lesion images with different sizes", arXiv preprint arXiv:2001.08844 (2020).
5. Chatterjee, S., Nizamani, F.A., Nürnberger, A. et al. "Classification of brain tumours in MR images using deep spatiotemporal models", *Sci Rep* 12, 1505 (2022), <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05572-6>.
6. Alhichri H., Alswayed A.S., Bazi Y., Ammour N., Alajlan N.A., "Classification of Remote Sensing Images Using EfficientNet-B3 CNN Model With Attention," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 14078-14094, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3051085.
7. "Batch Normalization – what is it?", [Electronic resource], URL: https://proproprogs.ru/neural_network/batch-normalization-batch-normalizaciya-cto-eto-takoe.
8. "Stop training when a monitored metric has stopped improving" [Electronic resource], URL: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/callbacks/EarlyStopping.

Submitted 02.02.2023; revised 13.04.2023

Information about the authors

Maksim A. Likhotin, Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: maximus-lihotin@mail.ru

РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛЬНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ ПОСТУПАЮЩИХ ЗАЯВОК

С.А. Олейникова, А.В. Дятчина

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: объектом исследования является обслуживающая или производственная система, одной из главных задач в которой будет эффективное с точки зрения выбранных критериев распределение входящего потока заявок по исполнителям. Цель данной работы – разработка математического обеспечения, которое является основой системы управления потоком поступающих заявок для решения задачи о назначении единичного задания с учетом нескольких критериев и временных ограничений. В результате предложена оптимизационная задача, учитывающая множество критериев, заданных соответствующими матрицами, описывающими степень эффективности выполнения каждой из работ каждым исполнителем, и временные ограничения, учитывающие расписание исполнителей, выполняющих задачи, поступившие ранее. Анализ специфики исследуемой задачи позволил прийти к выводу о целесообразности предварительной свертки критериев. Однако временные ограничения не позволяют применить известные методы решения аналогичных задач. В связи с этим, в качестве возможного варианта решения выбран эволюционный генетический алгоритм. Приведена структура хромосомы, а также описаны алгоритмы для формирования новой популяции, скрещивания и мутации, учитывающие временные ограничения и использующие в качестве фитнес-функции свертку критериев

Ключевые слова: задача о назначениях, временные ограничения, математическая модель

Введение

В современных условиях на предприятиях и организациях к диспетчерским службам предъявляются повышенные требования, связанные с качеством расписания. Поступающий поток заявок требуется распределить по специалистам таким образом, чтобы, с одной стороны, учесть существующий график загрузки каждого из них, с другой – опыт специалиста выполнения именно данного вида работ. В общем виде может быть целый ряд критериев (стоимостной, качество выполнения, время и т.д.), с точки зрения которого необходимо осуществлять данный выбор. В условиях большой интенсивности поступающего потока данная задача требует разработки специального математического и программного обеспечения для ее решения.

Данная задача относится к задачам о назначении. Классический вариант уже исследован, и получены решения некоторых ее обобщений и различных частных случаев. Однако, в каждом конкретном случае могут быть свои особенности, диктующие необходимость добавления новых критериев оптимизации и ограничений при разработке соответствующего математического обеспечения.

В данной работе рассмотрена многокритериальная задача назначения поступающих заявок специалистам. Ее особенностью являются временные ограничения, накладываемые на каждую задачу и отсутствие ограничений о закреплении за каждым специалистом единственной работы (возможно выполнение нескольких работ последовательно). Предложен математический аппарат, позволяющий

описать соответствующую оптимизационную задачу, а также методы ее решения.

Задача о назначениях и ее разновидности

Классическую задачу о назначениях можно сформулировать следующим образом. Пусть имеется N задач, которые необходимо распределить по N специалистам с точки зрения некоторого критерия (например, стоимостного). Ее математическая формулировка будет следующей

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \max(\min). \quad (1)$$

Здесь матрица c_{ij} определяет эффективность решения задачи i рабочим j (например, стоимостные затраты в случае задачи на минимум или некоторый показатель качества в случае максимизации критерия); x_{ij} – булева матрица, показывающая, будет ли рабочий j выполнять задачу i .

В классическом варианте задачи используются ограничения, не позволяющие одной задаче быть выполненной более, чем одним рабочим и одному рабочему выполнять более одной задачи. Они будут иметь вид:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad (2)$$

и

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (3)$$

соответственно.

Поскольку в классической постановке число работ и исполнителей совпадает, в формулах (2) и (3) имеем строгий знак равенства.

Кроме того, необходимо требование принадлежности каждой компоненты вектора x к дискретному множеству, содержащему лишь два значения:

- 0 – специалист не выполняет данную задачу;
- 1 – специалист выполняет данную задачу.

Это можно описать следующим образом:

$$x_{ij} \in \{0,1\}. \quad (4)$$

Очевидно, что данная задача относится к типу задач линейного программирования. Кроме того, это частный случай так называемой транспортной задачи, которая определяет объем перевозок между заданными поставщиками и потребителями. Для решения классической задачи о назначениях разработан специальный метод, который называется венгерским [1, 2].

Однако, на практике классическая задача о назначениях используется достаточно редко. Это связано с тем, что заказы в систему поступают не одновременно, а периодически с некоторой интенсивностью (постоянной или переменной). Это сказывается на загрузке специалистов решением предыдущих задач при поступлении текущей. Также зачастую оптимальность решения задачи зачастую определяется не одним, а несколькими критериями. Кроме наиболее используемого стоимостного критерия (стоимость выполнения данной работы данным исполнителем) можно использовать некоторый качественный и другие критерии. При этом целесообразно учесть время выполнения задания либо в дополнительном критерии либо в ограничениях [3]. Также очевидно, что число задач и исполнителей в реальных производствах будут очень редко совпадать. В связи с этим, требуется разработать математический аппарат, учитывающий все вышеперечисленные особенности.

В [2, 4, 6] более подробно описаны возможные разновидности классической задачи о назначениях и варианты решения подобных задач. Рассмотрим следующую постановку исследуемой задачи.

Формализация задачи и оптимизационная модель

Опишем представленную выше задачу в виде множества равенств и ограничений. Для этого введем следующие обозначения. Пусть N – количество рабочих, M – количество классов задач. Пусть к настоящему моменту известен график загруженности $Sch_i(t)$ каждого рабочего в каждый момент времени t . Его можно описать следующим образом:

$$Sch_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{если спец. } i \text{ занят в момент } t; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (5)$$

Пусть поступающую заявку разбили на J задач, подлежащих выполнению. Пусть также эффективность выполнения задачи j , $j=1, \dots, K$ рабочим i ,

$i=1, \dots, N$ с точки зрения некоторого критерия l определяется матрицей C^l .

Как и в классическом варианте, введем в рассмотрение матрицу $x=(x_{ij})$, каждая компонента x_{ij} которого показывает, будет ли рабочий i выполнять задачу j . Тогда множество целевых функций будут записаны в виде:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K c_{ij}^1 x_{ij} \rightarrow \max(\min) \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K c_{ij}^2 x_{ij} \rightarrow \max(\min) \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K c_{ij}^L x_{ij} \rightarrow \max(\min) \end{cases} \quad (6)$$

Для свертки критериев требуется задание весов α_l , показывающих их важность и удовлетворяющих условию:

$$\begin{cases} 0 \leq \alpha_l \leq 1 \\ \sum_{l=1}^L \alpha_l = 1 \end{cases} \quad (7)$$

Тогда многокритериальная задача может быть сведена к однокритериальной следующим образом:

$$\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K \alpha_l \tilde{c}_{ij}^l x_{ij} \rightarrow \min. \quad (8)$$

Здесь \tilde{c}_{ij}^l - значения матрицы c_{ij}^l , приведенные к так называемой единой балльной шкале. Такое приведение необходимо, в первую очередь, чтобы унифицировать диапазоны значений, хранящихся в каждой из матриц. В частности, если значения матрицы c_{ij}^1 будут на порядок больше (меньше) значений матрицы c_{ij}^2 , то последние не могут оказывать требуемой воздействие на целевую функцию (8). Другая причина, требующая перевода всех значений к единой балльной шкале – это возможные разные пределы критериев (например, первый из них стремится к минимуму, а второй – к максимуму). С учетом того, что итоговый критерий должен стремиться к минимуму, исходные матрицы необходимо преобразовать таким образом, чтобы чем больше были у них значений, тем хуже с точки зрения целевой функции.

Требование (3) в рассматриваемой задаче останется (только верхний предел изменится с учетом того, что число задач и исполнителей уже будет разным). Однако, теперь уже рабочий выполняет множество задач. В связи с этим, формула (2) будет справедлива лишь для данного момента времени. Поэтому из классической задачи будем рассматривать лишь равенство (3) с поправкой на число работ и ограничение (4).

В качестве ограничений рассмотрим необходимость выполнения всех задач в поставленные сроки. Для этого сначала определим возможное время начала выполнения задачи j у специалиста i .

$$t_{\text{нач}}(i, j) = \min(t^* : Sch_i(t) = 0, t^* \leq t \leq t^* + t_{ij}). \quad (9)$$

Формула (9) определяет время начала выполнения некоторой работы j специалистом i таким образом, исходя из занятости данного специалиста решением других задач: специалист должен быть свободен весь временной интервал, равный длительности выполнения им данной работы. Минимально возможное время начала такого интервала t^* и будет началом выполнения данной работы у данного специалиста.

Исходя из формулы (9), определим временные ограничения на директивный срок завершения работы:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij}(t_{\text{нач}}(i,j) + t_{ij}) \leq t_{j\text{дир}}. \quad (10)$$

Поскольку работу j может выполнить лишь один специалист, то только одно слагаемое в сумме будет ненулевым: если значение x_{ij} для данных индексов будет равно 1.

Равенства и неравенства (3)-(10) описывают минимальный набор требований, который может быть в данной задаче. Остальные требования будут зависеть от специфики задачи. Они могут зависеть от специфики заявок, подлежащих обслуживанию. Если это будут люди, то в дополнение к (3)-(10) возможно потребуется формулировать множество критериев, учитывающих специфику работы с людьми. Это может быть требование обслуживания в определенное время (или в пределах данного временного диапазона), недопустимость ожидания более определенного значения и т.д. Для заявок типа деталей время ожидания не критично. Возможно, для них будут предъявлены какие-то другие специфические требования.

Эти нюансы, возможно, внесут небольшие корректировки алгоритм решения задачи. Однако в целом, основная его идея останется неизменной.

Анализ подходов к решению задачи

Проанализируем специфику задачи, описанную ранее. Без условий (9) и (10) это сведенная к однокритериальной задаче многокритериальная задача. Она была описана в [5]. Однако, наличие временных ограничений существенно усложняет алгоритм решения. Действительно, для решения задачи с целевой функцией (8) без ограничений (9), (10) достаточно:

- привести матрицы s к единой балльной шкале;
- формировать из них новую матрицу C с учетом весовых ограничений.

По строкам в данной матрице будут отложены исполнители; по столбцам – работы.

Далее для каждой работы найти наилучшего ей с точки зрения матрицы C исполнителя (иными словами – минимум в соответствующем столбце матрицы).

Однако наличие временных ограничений требует пересмотреть данный подход. В частности,

вычислительная сложность не сильно увеличилась бы в случае, если предположить, что любой исполнитель будет решать не более одной из поступивших задач. В этом случае возможно:

- отфильтровать возможных исполнителей по возможности выполнения той или иной работы;
- из оставшегося списка составлять соответствия.

Но в исходной формулировке нет требования о том, чтобы число задач было меньше или равно числу исполнителей. А в противном случае необходимо учитывать ограничения на разные сочетания работ для каждого исполнителя. При наличии K задач, количество проверок для одного исполнителя будет составлять $K!$. В случае нескольких исполнителей это значение необходимо также умножить на N . Для большого числа задач это существенно усложнит алгоритм. В связи с этим, необходимо искать другие подходы к решению задачи.

Проанализируем возможные подходы, которые могут учесть эти ограничения. В случае, если число исполнителей невелико и временные ограничения исчисляются относительно небольшими единицами, наилучшим подходом будет являться метод динамического программирования. На каждом его этапе решается вопрос о назначении (или нет) данной задачи данному исполнителю. Фактически, если каждого исполнителя описать в виде ранца/рюкзака, то данную задачу можно описать как многомерную и многокритериальную задачу о рюкзаке. В качестве объема рюкзака и веса изделия здесь будут выступать временные показатели: время завершения задания и его длительность.

В случае, если количество исполнителей достаточно велико и/или временные ограничения захватывают достаточно большой отрезок времени, точные алгоритмы, к которым относится метод динамического программирования, не всегда целесообразны в силу отношений результат – время выполнения. В этом случае за приемлемое время может дать результат, близкий к оптимальному, генетический алгоритм. Общая схема алгоритма будет следующей:

1. Сформировать начальную популяцию;
2. Пока не завершена работа алгоритма;
 - 2.1. Осуществить операцию скрещивания;
 - 2.2. Осуществить операцию мутации;
 - 2.3. Отобрать следующее поколение;
3. Выдать наилучший результат.

Сформировав начальную популяцию, определим из нее наилучшее с точки зрения функции фитнеса значение. Функция фитнеса определяется формулой (8).

Цикл, описанный в п.2 алгоритма будет выполняться до тех пор, пока заданное число шагов не будет улучшения наилучшего значения, определенного ранее.

В качестве хромосомы возьмем бинарную матрицу размерности $N \times K$, где N – число исполнителей, а K – число поступивших задач. Каждый элемент x_{ij} матрицы равен 0, если данный исполнитель не будет выполнять данную работу, и 1 в противном случае. С учетом условия (3), каждую хромосому в начальном поколении необходимо формировать следующим образом.

Пока не будет сформировано заданное число хромосом

Нц

Цикл по j от 1 до K

Нц

повторять

Определить случайным образом исполнителя

Определить время окончания работы j

До тех пор, пока не будут выполнены временные ограничения

Кц

Кц

Как видно из данного алгоритма, для определения соответствия каждой работе организован цикл. Если для случайно выбранного исполнителя данную работу можно выполнить в заданные сроки, то данный ген хромосомы будет сформирован, в противном случае случайный выбор исполнителя будет выполнен повторно.

В итоге одна хромосома может иметь следующий вид (табл. 1).

Таблица 1

Пример хромосомы

	Заявка 1	Заявка 2	Заявка 3	Заявка 4
Исп1	0	0	0	1
Исп2	1	0	1	0
Исп3	0	1	0	0

Операцию скрещивания можно определить следующим образом.

1. Выбрать случайных родителей i_1 и i_2 .

2. В хромосому-потомка первые $K/2$ столбцов поместить от родителя i_1 , вторые – от родителя i_2 .

3. Проверить новую хромосому на выполнение всех временных ограничений: если они выполняются, то хромосома добавляется в новую популяцию, иначе – отбрасывается.

Операция мутации будет осуществляться следующим образом:

1. Выбрать случайным образом хромосому.

2. Выбрать случайным образом у нее столбцы i_1 и i_2 .

3. Поменять местами эти столбцы.

4. Проверить выполнение временных ограничений: если они имеют место, то мутация выполнена, иначе перейти к п.1.

В качестве следующего поколения будем выбирать заданное число наилучших с точки зрения функции фитнеса потомков.

Заключение

Целью данной работы являлась формализация задачи распределения входных заявок по исполнителям с учетом множества критериев оптимальности и временных ограничений. Получены следующие результаты, отличающиеся новизной.

1. Предложена целевая функция и ограничения для задачи распределения множества поступающих задач по специалистам с особенностями, описанными выше.

2. Проанализированы возможные подходы к решению данной задачи.

3. Описаны два подхода к ее решению: точный, в случае небольшого числа исполнителей, и приближенный, основывающийся на генетических алгоритмах.

4. Детализированы такие этапы генетического алгоритма, как формирование новой популяции, скрещивание и мутация.

Следующим этапом будет являться детальное тестирование работы данного алгоритма на различных исходных данных для оценки качества его работы и обоснованию его эффективности.

Литература

1. Беленький А.С. Исследование операций в транспортных системах: идеи и схемы методов оптимизации планирования. М.: Мир, 1992. 582 с.

2. Вагнер Г. Основы исследования операций. М.: Мир, 1972. Т. 1. 336 с.

3. Олейникова С.А., Менкова Е.С. Динамическая задача о назначении единичного задания с временными ограничениями // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 6. С. 19-24.

4. Леякова Л.В., Харитонова А.Г., Чернышева Г.Д. Прикладные задачи о назначениях // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2017. № 2. С. 22-27.

5. Шукина Н.А. Некоторые подходы к решению задачи о назначениях // Проблемы экономики и менеджмента. 2016. № 5(57). С. 169 – 174.

6. Reuven Cohen, Liran Katzir, and Danny Raz. An Efficient Approximation for the Generalized Assignment Problem // Information Processing Letters, Vol. 100, Is. 4, November 2006. Pp. 162–166.

Информация об авторах

Олейникова Светлана Александровна – д-р техн. наук, доцент, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: s.a.oleynikova@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0333-2313>

Дятчина Анастасия Владимировна – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: thenochnaya@mail.ru

DEVELOPMENT OF SPECIAL MATHEMATICAL SOFTWARE FOR THE SYSTEM OF CONTROL OF THE INCOMING APPLICATIONS FLOW

S.A. Oleinikova, A.V. Dyatchina

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the object of the study is a service or production system, one of the main tasks in which will be the efficient distribution of the incoming flow of applications by performers in terms of the selected criteria. The purpose of this work is to develop software that will be the basis of the system for managing the flow of incoming applications. to solve the problem of assigning a single task, taking into account several criteria and time constraints. As a result, an optimization problem is proposed that takes into account a set of criteria specified by the corresponding matrices that describe the degree of efficiency of each work performed by each performer, and time constraints that take into account the schedule of performers performing tasks that have arrived earlier. Analysis of the specifics of the problem under study made it possible to come to the conclusion about the expediency of preliminary convolution of the criteria. However, time constraints do not allow the use of well-known methods for solving similar problems. In this regard, an evolutionary genetic algorithm has been chosen as a possible variant of its solution. The paper presents the structure of the chromosome, and also describes algorithms for the formation of a new population, crossing and mutation, taking into account time constraints and using convolution of criteria as a fitness function

Key words: assignment problem, time constraints, mathematical model

References

1. Belenkiy A.S. “Research of operations in transport systems: ideas and schemes of planning optimization methods” (“Issledovanie operatsiy v transportnykh sistemah: idei i shemy metodov optimizatsii planirovaniya”), Moscow: Mir, 1992, 582 p.
2. Vagner G. “Operations Research Fundamentals” (“Osnovy issledovaniya operatsiy”), vol.1, Moscow: Mir, 1972, 336 p.
3. Oleinikova S.A., Menkova E.S., Oleinikova S.A. “Dynamic problem on assigning a single task with time limits «Software and information system for finding the optimal solution to the assignment problem”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol.1, no 6, pp. 19-24.
4. Lelyakova L.V., Kharitonova A.G., Chernysheva G.D. “Applied Assignment Problems”, *The Bulletin of Voronezh State University, Sec. System Analysis and Information Technology (Vestnik VGU. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsion-nyye tekhnologii)*, 2017, no 2, pp. 22-27.
5. Chshukina N.A. “Some approaches to solving the assignment problem”, *Problems of economics and management (Problemy ekonomiki i menedzhmenta)*, 2016, no 5 (57), pp. 169-174.
6. Cohen Reuven, Katzir Liran, Raz Danny. “An Efficient Approximation for the Generalized Assignment Problem”, *Information Processing Letters*, vol. 100, iss. 4, November 2006, pp. 162–166.

Submitted 06.02.2023; revised 18.04.2023

Information about the authors

Svetlana A. Oleinikova, Dr. Sc. (Technical), Assistant Professor, Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: s.a.oleynikova@gmail.com

Anastasiya V. Dyatchina, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: thenochnaya@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДЛИННОЙ ЛИНИИ НА ОСНОВЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ЦЕПИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

И.С. Киреев, И.В. Зубарев, В.Л. Бурковский

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: проводятся аналогии и осуществляется анализ источников электромагнитных излучений, в качестве которых выступают линии электропередач (ЛЭП), теория которых базируется на описании цепей с распределенными параметрами (длинными линиями). Рассматриваются телеграфные уравнения и способ их аналитического решения. Получение аналитических зависимостей выполняется на основе представления длинной линии эквивалентной схемы в виде пассивной цепи, состоящей из погонных емкостей, индуктивностей и проводимостей. Запись телеграфных уравнений базируется на классическом методе анализа на основе закона Ома и правил Кирхгофа с применением метода комплексных амплитуд. Полученные аналитические зависимости позволяют анализировать процессы распространения токов и напряжений в длинной линии во времени и пространстве. Проводится компьютерное моделирование во временной области прохождения сигнала в виде прямоугольного импульса через длинную линию при разных величинах сопротивления нагрузки, а также представлен анализ зависимости формы выходного сигнала от числа сегментов длинной линии. Перспективой развития рассматриваемого вопроса является переход от описания в теории токов и напряжений к описанию в теории напряженностей электрического и магнитного поля (создание модели электромагнитного взаимодействия)

Ключевые слова: математическое моделирование, цепи с распределенными параметрами, временное моделирование, линии электропередач (ЛЭП), теория длинных линий

Введение

Для анализа процессов электромагнитного взаимодействия в длинной линии широкое применение находит модель цепи с распределенными параметрами. Такие цепи представляют собой электромагнитное устройство, габаритные размеры которого могут быть соизмеримы с длиной волны (частотой) электромагнитных колебаний, возбуждаемых в линии [1]. Длина волны определяется известным соотношением:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме, λ – длина волны, f – частота сигнала.

Если длина объекта соизмерима с длиной волны (тракт передачи, фидер, линия электропередачи), а остальные длины много меньше λ , такое устройство именуют длинной линией [2]. На рис. 1 приведен пример двухпроводной линии с подключенной к концу нагрузкой R_H и внутренним сопротивлением генератора R_C .

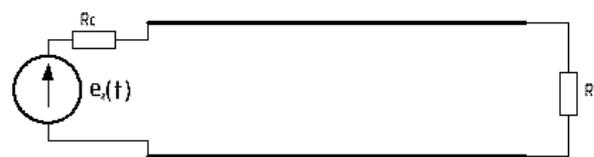


Рис. 1. Двухпроводная линия в качестве длинной линии

Представим длинную линию как последовательное соединение бесконечно малых отрезков dx (рис. 2).

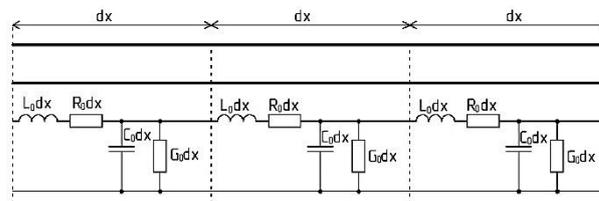


Рис. 2. Эквивалентная схема длинной линии

Каждый отрезок можно рассматривать как бесконечно малую индуктивность $L_0 dx$, сопротивление потерь $R_0 dx$, емкость $C_0 dx$, так как в линии имеются два проводника и слой диэлектрика в виде воздуха, а также $G_0 dx$ – сопротивление утечки. Величины L_0 , C_0 а также R_0 и G_0 принято именовать погонными параметрами цепи с распределенными параметрами. Схема, представленная на рис. 2, является эквивалентной электрической схемой

длинной линии, которую можно анализировать известными методами на основе теории электрических цепей.

Телеграфные уравнения длинной линии

Для анализа длинной линии целесообразно ввести некую функцию $s(x)$, которая в общем случае будет являться током, либо напряжением. Каждый из сегментов цепи с распределенными параметрами в точке x от начала координат функции $s(x)$, либо в точке x' от начала координат функции $s(x')$ можно представить в виде схемы (рис. 3). В данной схеме можно ввести мгновенные значения токов и напряжений. Обозначим длину линии передачи как L , тогда $x' = L - x$.

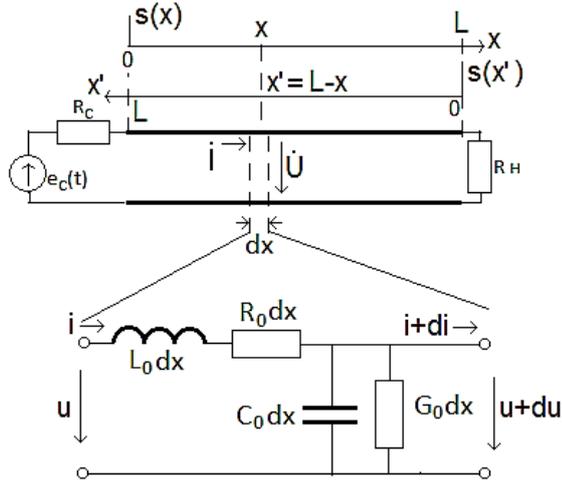


Рис. 3. Схема замещения сегмента длинной линии

Таким образом, согласно первому правилу Кирхгофа можно записать

$$i = (i + di) + C_0 dx \frac{du}{dt} + G_0 dx u, \quad (2)$$

тогда

$$-di = C_0 dx \frac{du}{dt} + G_0 dx u. \quad (3)$$

Умножая левую и правую часть (3) на $1/dx$ получим

$$-\frac{di}{dx} = C_0 \frac{du}{dt} + G_0 u. \quad (4)$$

Согласно второму правилу Кирхгофа получаем следующее

$$L_0 dx \frac{di}{dt} + R_0 dx \cdot i + (u + du) = u, \quad (5)$$

тогда

$$L_0 dx \frac{di}{dt} + R_0 dx i = -du. \quad (6)$$

Умножая левую и правую часть (6) на $1/dx$ получим

$$-\frac{du}{dx} = L_0 \frac{di}{dt} + R_0 i. \quad (7)$$

Таким образом, обобщая результаты (4) и (7) получаем систему телеграфных уравнений длинной линии

$$\begin{cases} -\frac{di}{dx} = C_0 \frac{du}{dt} + G_0 u, \\ -\frac{du}{dx} = L_0 \frac{di}{dt} + R_0 i. \end{cases} \quad (8)$$

Как видно, токи и напряжения являются функциями координаты и времени

$$\begin{cases} i = f(x, t), \\ u = f(x, t). \end{cases} \quad (9)$$

Тогда уравнения (8) переписутся в виде [3]

$$\begin{cases} -\frac{di(x, t)}{dx} = C_0 \frac{du(x, t)}{dt} + G_0 \cdot u(x, t), \\ -\frac{du(x, t)}{dx} = L_0 \frac{di(x, t)}{dt} + R_0 i(x, t). \end{cases} \quad (10)$$

Рассматривая гармонические возбуждения в длинной линии, имеет место использовать метод комплексных амплитуд и ввести обозначения тока $\dot{I}(x)$ и напряжения $\dot{U}(x)$, которые будут являться комплексными амплитудами соответствующих мгновенных токов и напряжений, тогда схема приобретет вид, представленный на рис. 4.

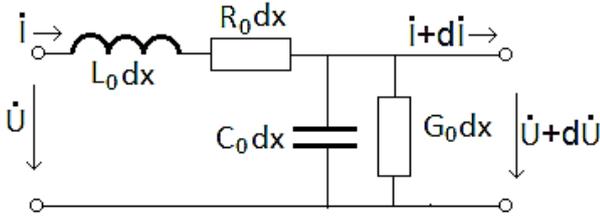


Рис. 4. Токи и напряжения в сегменте длинной линии

Таким образом, систему уравнений (10) можно представить в следующем виде

$$\begin{cases} -\frac{dI(x)}{dx} = j\omega C_0 \dot{U}(x) + G_0 \dot{U}(x), \\ -\frac{d\dot{U}(x)}{dx} = j\omega L_0 I(x) + R_0 I(x). \end{cases} \quad (11)$$

Систему (11) можно представить в виде

$$\begin{cases} -\frac{dI(x)}{dx} = (j\omega C_0 + G_0) \dot{U}(x), \\ -\frac{d\dot{U}(x)}{dx} = (j\omega L_0 + R_0) I(x). \end{cases} \quad (12)$$

На основе закона Ома система (12) запишется через проводимость и сопротивление

$$\begin{cases} -\frac{dI(x)}{dx} = (j\omega C_0 + G_0) \dot{U}(x), \\ -\frac{d\dot{U}(x)}{dx} = (j\omega L_0 + R_0) I(x). \end{cases} \quad (13)$$

Подставив одно уравнение в другое получаем

$$\begin{cases} \frac{d^2 I(x)}{dx^2} - \gamma^2 I(x) = 0, \\ \frac{d^2 \dot{U}(x)}{dx^2} - \gamma^2 \dot{U}(x) = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Величина $\gamma = \sqrt{Z_0 Y_0} = \alpha + j\beta$ является комплексной величиной и называется постоянной распространения. Действительная часть данной постоянной α является коэффициентом затухания, β – коэффициентом фазы. Для данных констант справедливы следующие записи

$$\begin{aligned} \alpha &= \operatorname{Re}\{\gamma\} = \\ &= \operatorname{Re}\{\sqrt{[j\omega L_0 + R_0][j\omega C_0 + G_0]}\}, \\ \beta &= \operatorname{Im}\{\gamma\} = \\ &= \operatorname{Im}\{\sqrt{[j\omega L_0 + R_0][j\omega C_0 + G_0]}\}. \end{aligned} \quad (15)$$

В идеальном случае, в линии без потерь при R_0 и G_0 равные нулю получим

$$\gamma = \sqrt{[j\omega L_0][j\omega C_0]} = j\omega\sqrt{L_0 C_0}. \quad (16)$$

Таким образом, у идеальной длинной линии имеется лишь коэффициент фазы.

Общий вид решения телеграфного уравнения

Телеграфные уравнения длинной линии являются дифференциальными уравнениями второго порядка и записываются для тока и напряжения в комплексной форме с учетом (16) в виде системы (17)

$$\begin{cases} \frac{d^2 I(x)}{dx^2} - \gamma^2 I(x) = 0, \\ \frac{d^2 \dot{U}(x)}{dx^2} - \gamma^2 \dot{U}(x) = 0. \end{cases} \quad (17)$$

На основе (17) можно записать характеристическое уравнение, принимающее следующий вид

$$p^2 - \gamma^2 = 0. \quad (18)$$

Решая уравнение (18) относительно неизвестной переменной p , получаем пару корней: $p_1 = \gamma$ и $p_2 = -\gamma$.

В общем виде, решение, записанное для напряжения, будет иметь вид

$$\dot{U}(x) = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x}. \quad (19)$$

Используем уравнение (20)

$$-\frac{d\dot{U}(x)}{dx} = Z_0 I(x). \quad (20)$$

Получим следующую запись для тока

$$\begin{aligned} I(x) &= \frac{1}{Z_0} [-A_1 \gamma \cdot e^{\gamma x} + A_2 \gamma \cdot e^{-\gamma x}] = \\ &= \frac{\gamma}{Z_0} [-A_1 \cdot e^{\gamma x} + A_2 \cdot e^{-\gamma x}] = \\ &= \frac{1}{Z_C} [-A_1 \cdot e^{\gamma x} + A_2 \cdot e^{-\gamma x}], \end{aligned} \quad (21)$$

где с учетом $\gamma^2 = \sqrt{Z_0 Y_0}$, получим выраже-

ние (22)

$$Z_C = \frac{Z_0}{\gamma} = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} = \sqrt{\frac{j\omega L_0 + R_0}{j\omega C_0 + G_0}}. \quad (22)$$

Выражение (22) представляет собой запись волнового сопротивления длинной линии в комплексной форме. Рассматривая идеальную длинную линию без потерь, волновое сопротивление является активным и определяется формулой (23)

$$Z_C = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \quad (23)$$

Коэффициенты A_1 и A_2 являются постоянными интегрирования и выбираются на основе начальных условий. В качестве начальных условий, как правило, выступают величины тока и напряжения вначале длинной линии (\dot{I}_1, \dot{U}_1) или в конце длинной линии (\dot{I}_2, \dot{U}_2), что является наиболее распространенным случаем. В случае, когда имеются \dot{I}_2 и \dot{U}_2 в конце длинной линии, когда $x = L$, таким образом запишем

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \frac{1}{Z_C} [-A_1 \cdot e^{\gamma L} + A_2 \cdot e^{-\gamma L}], \\ \dot{U}_2 &= A_1 e^{\gamma L} + A_2 e^{-\gamma L}. \end{aligned} \quad (24)$$

Решая систему линейных уравнений (24) определим обобщенные выражения для постоянных интегрирования (25)

$$\begin{cases} A_1 = \frac{\dot{U}_2 - Z_C \dot{I}_2}{2} e^{-\gamma L}, \\ A_2 = \frac{\dot{U}_2 + Z_C \dot{I}_2}{2} e^{\gamma L}. \end{cases} \quad (25)$$

Для $\dot{I}(x)$ и $\dot{U}(x)$ получим

$$\begin{aligned} \dot{I}(x) &= \frac{1}{Z_C} [-A_1 \cdot e^{\gamma x} + A_2 \cdot e^{-\gamma x}] = \\ &= -B_1 e^{\gamma x} + B_2 e^{-\gamma x}, \\ \dot{U}(x) &= A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x}, \end{aligned} \quad (26)$$

где коэффициенты B_1 и B_2 имеют вид

$$\begin{cases} B_1 = \frac{A_1}{Z_C} = \frac{\dot{U}_2 - Z_C \dot{I}_2}{2Z_C} e^{-\gamma L}, \\ B_2 = \frac{A_2}{Z_C} = \frac{\dot{U}_2 + Z_C \dot{I}_2}{2Z_C} e^{\gamma L}. \end{cases} \quad (27)$$

По полученным значениям комплексных амплитуд для тока $\dot{I}(x)$ и напряжения $\dot{U}(x)$ запишем выражения для мгновенного значения $i(t, x)$ и $u(t, x)$, являющиеся функциями времени и координаты

$$\begin{cases} i(t, x) = \text{Re}\{\dot{I}(x)e^{j\omega t}\} = \\ = \text{Re}\{-B_1 \cdot e^{\gamma x} e^{j\omega t} + B_2 \cdot e^{-\gamma x} e^{j\omega t}\}, \\ u(t, x) = \text{Re}\{\dot{U}(x)e^{j\omega t}\} = \\ = \text{Re}\{A_1 e^{\gamma x} e^{j\omega t} + A_2 e^{-\gamma x} e^{j\omega t}\}. \end{cases} \quad (28)$$

Таким образом

$$\begin{aligned} u(t, x) &= \text{Re}\{A_1 e^{\gamma x} e^{j\omega t} + A_2 e^{-\gamma x} e^{j\omega t}\} = \\ &= A_1 e^{\alpha x} \cos(\omega t + \beta x) + \\ &+ A_2 e^{-\alpha x} \cos(\omega t - \beta x) = \\ &= u_{\text{отр}}(t, x) + u_{\text{пад}}(t, x), \end{aligned} \quad (29)$$

где $u_{\text{отр}}(t, x)$ и $u_{\text{пад}}(t, x)$ – отраженная и падающая волна в длинной линии, соответственно

Моделирование процесса прохождения импульсного сигнала через длинную линию

Рассмотренная структура длинной линии справедлива для бесконечно малого отрезка. Анализ переходных процессов аналитическим методом для реальных длинных линий является затруднительным, в связи с чем следует прибегнуть к средствам вычислительной техники и провести расчет сигнала на выходе длинной линии численным методом с использованием пакетов схемотехнического моделирования [4].

При моделировании условимся, что число элементарных звеньев $n = 16$, погонные параметры имеют следующие характеристики: $L_0 = 390$ мкГн/км; $C_0 = 4700$ пФ/км; $R_{\text{л}} = 150$ Ом/км; $R_{\text{пр}} = 1$ Ом.

Временное моделирование прохождения прямоугольного импульса через сегменты длинной линии при сопротивлении нагрузки 40 Ом приведено на рис. 5.

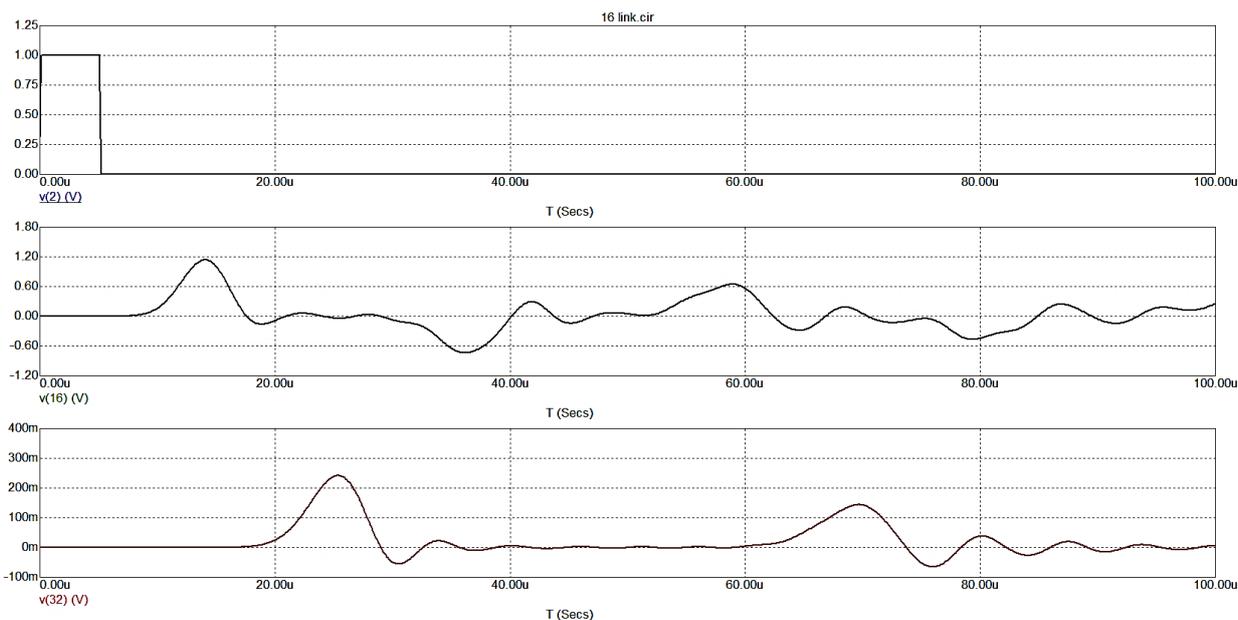


Рис. 5. 16 сегментная линия, нагруженная на 40 Ом

На рис. 5 верхний график соответствует сигналу от источника, средний график соответствует сигналу в середине длинной линии, нижний график иллюстрирует сигнал на выходе длинной линии (в нагрузке). Разность между

средним и нижним графиком характеризует задержку в длинной линии. На рис. 6 приведена временная диаграмма, характеризующая сигнал при сопротивлении нагрузки 288 Ом.

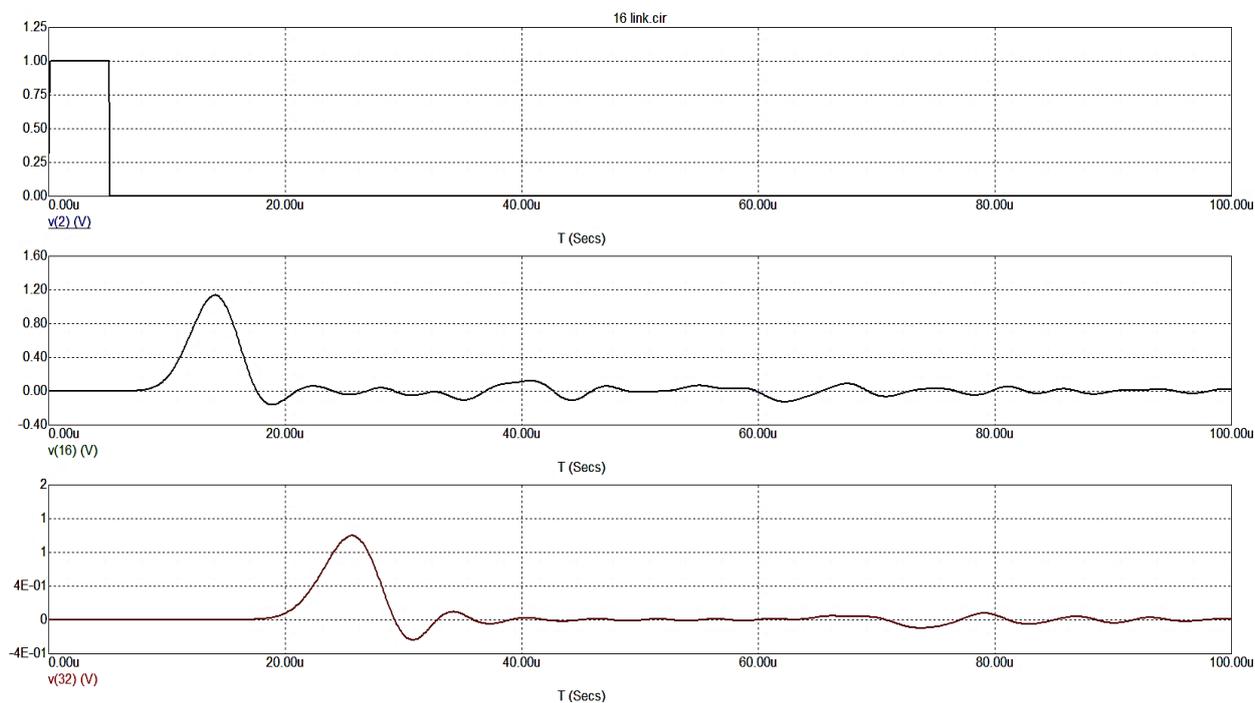


Рис. 6. 16 сегментная линия, нагруженная на 288 Ом

Как видно, форма сигнала изменилась, так как изменилось согласование длинной линии. Рассмотрим случай, когда в длинной линии от-

существовала R_{Π} и изменены прочие погонные параметры (рис. 7). Сопротивление нагрузки выберем 300 Ом.

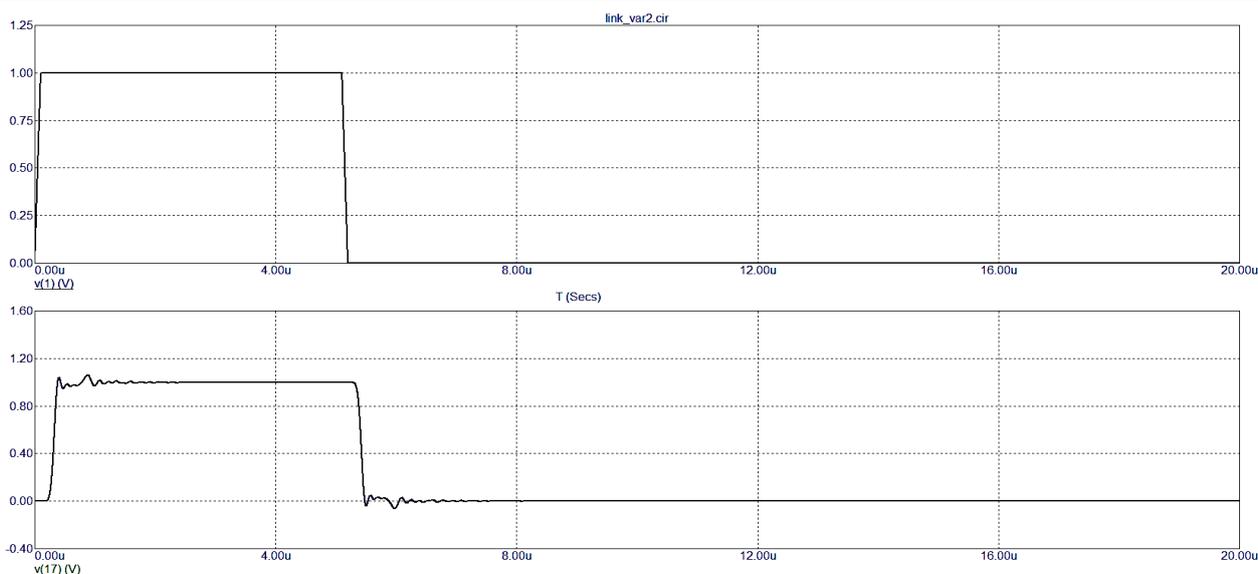


Рис. 7. Видоизмененная модель длинной линии

Как видно, в длинной линии практически отсутствует отраженная волна, а это значит, что цепь работает в режиме, близком к режиму согласованной нагрузки [5], при котором сопротивление определяется по формуле (23)

$$Z_C = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \sqrt{\frac{0.01 \cdot 10^3}{100 \cdot 10^{-9}}} = 316 \text{ Ом.} \quad (30)$$

Заключение

В рамках данной статьи подробно проанализирован математический аспект теории длинных линий и установлена связь между физическими процессами, протекающими в длинных линиях. Представлены телеграфные уравнения, описывающие работу длинных линий в теории токов и напряжений, проведено временное моделирование прохождения сигнала через длинную линию при разных величинах сопротивления нагрузки и разной структуре цепи с

распределенными параметрами. Дальнейшей перспективой развития данной тематики является переход от описания длинных линий в рамках теории токов и напряжений к описанию в рамках электромагнитного моделирования, то есть описания в терминах векторов напряженностей электрического и магнитного поля.

Литература

1. Попов В.П. Основы теории цепей: учебник для бакалавров. М.: Юрайт, 2015. 696 с.
2. Баскаков В.П., Журавлев О.Б., Крук Б.И. Основы анализа цепей: учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия-Телеком, 2014. 591 с.
3. Логвинов В.В., Фриск В.В. Схемотехника телекоммуникационных устройств: учебное пособие. М.: Салон пресс, 2011. 656 с.
4. Арсеньев Г.Н. Основы теории цепей. М.: «Форум», 2014. 447 с.
5. Теория электрической связи: учебник для вузов / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, В.И. Коржик, М.В. Назаров; Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 1999. 432 с.

Поступила 03.02.2023; принята к публикации 18.04.2023

Информация об авторах

Киреев Иван Сергеевич – аспирант кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vanchez_kireev@mail.ru, тел. +7 (473) 243-77-20

Зубарев Игорь Валентинович – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: zubarev71@gmail.com, тел. +7 (473) 243-77-20

Бурковский Виктор Леонидович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bvl@vorstu.ru, тел. +7 (473) 243-77-20

MATHEMATICAL MODELING OF LONG LINE OPERATION BASED ON REPRESENTATION AS A CHAIN WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

I.S. Kireev, I.V. Zubarev, V.L. Burkovsky

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: in this paper some analogies are made, and the analysis of electromagnetic radiation sources is carried out. These sources are power transmission lines (power lines), the theory of which is based on the description of circuits with distributed parameters (long lines). Telegraphic equations and the method of their analytical solution are considered. The analytical dependences are obtained based on the representation of a long line by an equivalent circuit in the form of a passive circuit consisting of linear capacitances, inductances and conductivities. The recording of telegraphic equations is based on the classical method of analysis based on Ohm's law and Kirchhoff's rules using the method of complex amplitudes. The obtained analytical dependences make it possible to analyze the processes of propagation of currents and voltages in a long line in time and space. A computer simulation is carried out in the time domain of the passage of a signal in the form of a rectangular pulse through a long line at different values of load resistance, and the dependence of the shape of the output signal on the number of segments of the long line is analyzed. The perspective of the development of the issue under consideration is the transition from the description in the theory of currents and voltages to the description in the theory of electric and magnetic field strengths (creation of a model of electromagnetic interaction)

Key words: mathematical modeling, circuits with distributed parameters, time modeling, power transmission lines (power lines), theory of long lines

References

1. Popov V.P. "Fundamentals of circuit theory: textbook for bachelors" ("Osnovy teorii tsepey: uchebnik dlya bakalavrov"), Moscow: Yurayt, 2015, 696 p.
2. Baskakov V.P., Zhuravlev O.B., Kruk B.I. "Fundamentals of circuit analysis: textbook for universities" ("Osnovy analiza tsepey: uchebnoye posobiye dlya vuzov"), Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2014, 591 p.
3. Logvinov V.V., Frisk V.V. "Circuit engineering of telecommunication devices: textbook" ("Skhemotekhnika telekommunikatsionnykh ustroystv: uchebnoye posobiye"), Moscow: Salon press, 2011, 656 p.
4. Arsenyev G.N. "Fundamentals of the theory of circuits" ("Osnovy teorii tsepey"), Moscow: Forubi, 2014, 447 p.
5. Zyuko A.G., Kloovsky D.D., Korzhik V.I., Nazarov M.V. "Theory of electrical communication: textbook for universities" ("Teoriya elektricheskoy svyazi: uchebnik dlya vuzov", ed. by Kloovsky D.D., Moscow: Radio i svyaz', 1999, 432 p.

Submitted 03.02.2023; revised 18.04.2023

Information about the authors

Ivan S. Kireev, Post-graduate student, Department of electric drive, automation and control in technical systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya st., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vanchez_kireev@mail.ru, tel. +7 (473) 243-77-20

Igor V. Zubarev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of electric drive, automation and control in technical systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya st., Voronezh 394006, Russia), e-mail: zubarev71@gmail.com, tel. +7 (473) 243-77-20

Victor L. Burkovsky, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473) 243-77-20, e-mail: bvl@vorstu.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТВЕРДОТЕЛЬНОМ ВОЛНОВОМ ГИРОСКОПЕ С ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

И.Л. Батаронов, Г.Е. Шунин, С.А. Кострюков, В.В. Пешков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: при помощи метода конечных элементов решены задача на собственные значения и смешанная краевая задача для системы связанных дифференциальных уравнений в частных производных линейной теории электроупругости, описывающей колебания цилиндрического резонатора твердотельного волнового гироскопа с пьезоэлектрическими преобразователями. Для решения использовалась разработанная интегрированная система конечно-элементного анализа гравитационных датчиков. Рассчитаны спектр собственных частот, энергия упругой деформации и диссипативные характеристики колеблющегося резонатора. Показана эволюция формы колебаний резонатора, возбуждаемого переменным синусоидальным напряжением заданной амплитудой на рабочей частоте резонатора, приложенным к двум противоположным пьезоэлементам, в разные моменты времени. Найдена временная зависимость электрических потенциалов на пьезоэлементах, уровень неустраиваемых фоновых переменных электрических потенциалов на приёмных пьезоэлементах, расположенных под углом 45 градусов к пьезоэлементам системы возбуждения. Проведена оценка минимально возможного времени выхода твердотельного волнового гироскопа на рабочий режим для выбранной конструктивной схемы при заданных параметрах возбуждения, обусловленного инерционностью резонатора гироскопа. Эти факторы должны учитываться при выборе конструкции резонатора и системы съёма и обработки сигнала с пьезоэлементов гироскопа

Ключевые слова: твердотельный волновой гироскоп, цилиндрический резонатор, уравнения электроупругости, смешанная краевая задача, задача на собственные значения, конечно-элементный анализ

Введение

В настоящее время широкое применение в технике находят сравнительно дешёвые твердотельные волновые гироскопы (ТВГ) средней и низкой точности с металлическими резонаторами различной формы. Довольно эффективной оказалась конструкция ТВГ с цилиндрическим резонатором [1]. Она часто используется в качестве прототипа при разработке ТВГ как в России, так и за рубежом [2]. Для решения требуемых целевых задач вносятся изменения в конструктивную схему прототипа разрабатываемого ТВГ. Это приводит к необходимости математического моделирования ТВГ с целью достижения заданных метрологических параметров и характеристик. Моделирование осуществляется с помощью систем конечно-элементного анализа, таких, как Comsol Multiphysics, Ansys и других. Так, например, в работе [3] рассчитывались термоупругие потери и влияние дефектов формы и малых неоднородностей плотности цилиндрического резонатора ТВГ на его собственные частоты. В работе [4] изучалось влияние пьезоэлементов, располо-

женных на цилиндрическом резонаторе ТВГ, на спектр его собственных частот.

В данной работе определены спектр собственных частот, энергетические и диссипативные характеристики колеблющегося резонатора ТВГ. Рассчитана временная электрических потенциалов на пьезоэлементах и проведена оценка времени выхода ТВГ на рабочий режим.

Постановка задачи

Математическая модель электромеханических процессов в резонаторе ТВГ определяется системой связанных дифференциальных уравнений в частных производных линейной теории электроупругости [5]

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0,$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= 0, \\ \nabla \times \mathbf{E} &= 0, \end{aligned}$$

где ρ – плотность материала, \mathbf{u} – векторное поле смещений, \mathbf{E} – вектор напряжённости электрического поля, \mathbf{D} – вектор индукции электрического поля, $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений второго ранга.

Используются линейные материальные соотношения

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{c} : \mathbf{s} - \mathbf{d}^* \cdot \mathbf{E},$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{d} : \mathbf{s} + \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{E},$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \varepsilon_0 \boldsymbol{\varepsilon}_r,$$

электрическое поле выражается через скалярный потенциал V :

$$\mathbf{E} = -\nabla V.$$

Здесь \mathbf{c} – тензор модулей упругости 4-го ранга, $\mathbf{s} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^*)$ – тензорное поле деформаций 2-го ранга, \mathbf{d} – тензор пьезоэлектрических модулей 3-го ранга, ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость, $\boldsymbol{\varepsilon}_r$ – тензор относительной диэлектрической проницаемости материала 2-го ранга.

Задаются начальные условия в области решения задачи Ω :

$$\mathbf{u}_0 = 0,$$

$$\dot{\mathbf{u}}_0 = 0,$$

и граничные условия на соответствующих частях границы

$$\mathbf{u} = 0,$$

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = 0,$$

$$V = 0,$$

$$V = V_{\sim},$$

где V_{\sim} – заданная функция времени, \mathbf{n} – вектор нормали к границе области.

Для нахождения собственных частот и форм колебаний резонатора ТВГ решается краевая задача для уравнения

$$\rho \omega^2 \mathbf{u} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0.$$

Здесь $\omega = 2\pi f$, f – собственная частота.

Диссипативные процессы в материале резонатора учитываются в модифицированном выражении для тензора напряжений:

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 + iQ^{-1}) \mathbf{c} : \mathbf{s},$$

где Q^{-1} – безразмерный коэффициент внутреннего трения материала.

Для решения этих краевых задач использовалась интегрированная система конечно-элементного анализа гравиинерциальных датчиков [6].

Результаты и их обсуждение

Для вычислительных экспериментов был взят один из возможных вариантов конструкции датчика ТВГ, предложенного в [1]. Конструктивная схема и геометрия сечения этого варианта датчика плоскостью, проходящей через ось симметрии, показана на рис. 1.

Предполагалось, что корпус и цилиндрический резонатор датчика изготовлен из стали марки 12X18H10T (плотность – 7900 кг·м⁻³, модуль Юнга – 198·10⁹ Па, коэффициент Пуассона – 0,3, добротность 75000). Восемь пьезоэлементов размером 8×2×0,25 мм³ из керамики PZT-4 (плотность 7500 кг·м⁻³; ненулевые элементы матриц: модулей податливости $c_{11} = c_{22} = 12,3 \cdot 10^{-12}$ Па⁻¹, $c_{33} = 15,5 \cdot 10^{-12}$ Па⁻¹, $c_{12} = c_{21} = -4,05 \cdot 10^{-12}$ Па⁻¹, $c_{13} = c_{31} = c_{23} = c_{32} = -5,31 \cdot 10^{-12}$ Па⁻¹, $c_{44} = c_{55} = 39 \cdot 10^{-12}$ Па⁻¹, $c_{66} = 32,7 \cdot 10^{-12}$ Па⁻¹; пьезоэлектрических модулей $d_{31} = d_{32} = -123 \cdot 10^{-12}$ Кл·Н⁻¹, $d_{33} = 289 \cdot 10^{-12}$ Кл·Н⁻¹, $d_{24} = d_{15} = 496 \cdot 10^{-12}$ Кл·Н⁻¹; относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{r11} = \varepsilon_{r22} = 1475$, $\varepsilon_{r33} = 1300$, добротность 1000), с металлизированными верхними и нижними гранями, наклеены на резонатор, как показано на рис. 1.

Пьезоэлементы были разбиты на призматические, а корпус и резонатор на тетраэдральные лагранжевы элементы 2-го порядка. Число конечных элементов было около 379 тыс., среднее качество элементов – 0,68, число степеней свободы – около 1,93 млн.

На верхней поверхности основания корпуса (3 на рис. 1) задавалось граничное условие $\mathbf{u} = 0$, а на других частях поверхности датчика ТВГ граничное условие $\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = 0$.

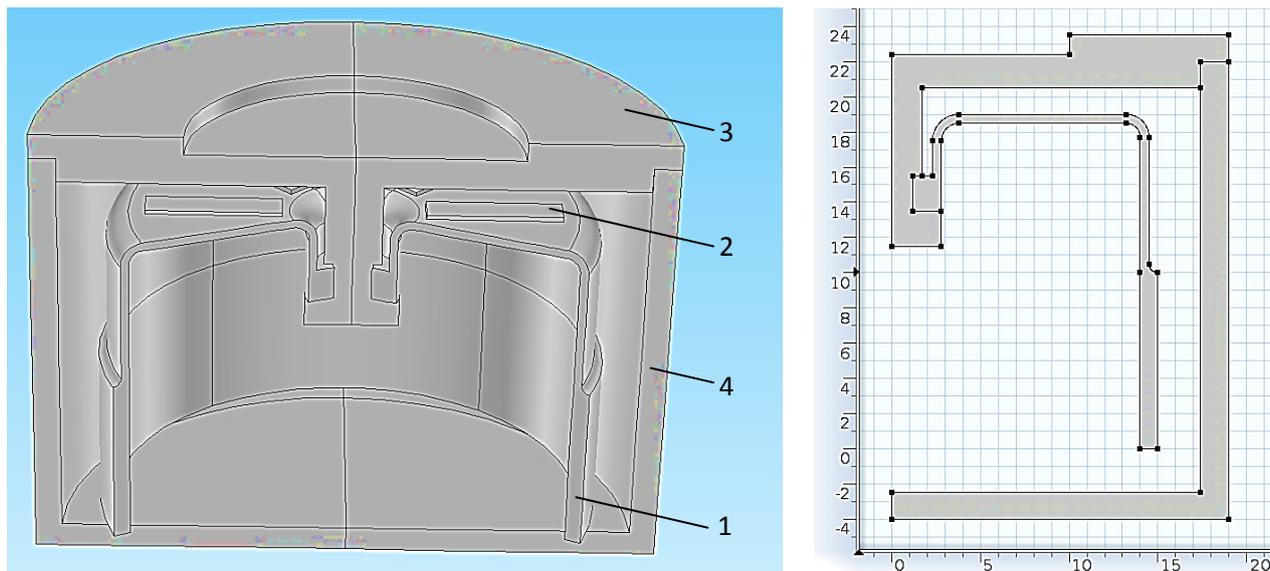


Рис. 1. Конструктивная схема и геометрия сечения датчика ТВГ (размеры в мм):
1 – цилиндрический резонатор, 2 – пьезоэлемент, 3 – основание корпуса, 4 – корпус

Собственные частоты f , Гц	Энергия упругой деформации W , отн. ед.	Добротность резонатора Q	Время затухания τ_d , с
1432.22148+0.0879i	0.071178	8146.59774	1.81058
1432.34124+0.0879i	0.071472	8147.46082	1.81062
2706.39598+0.02057i	0.324832	65771.9547	7.73570
3731.54256+0.22465i	0.62561	8305.28693	0.708462
5690.1332+0.04564i	1.00000	62339.0354	3.48728
5690.59724+0.04564i	0.99672	62337.3829	3.48692
11292.51221+0.10099i	6.63180	55909.9843	1.575974
11294.31448+0.10102i	6.66282	55899.2337	1.575420
14940.62961+0.1021i	7.10283	73296.8381	1.561588
14941.74967+0.10197i	7.04389	73193.3517	1.5592676

В таблице приводятся результаты расчётов собственных частот, энергии упругой деформации, добротности и времени затухания колебаний резонатора на собственных частотах. Энергия упругой деформации на собственных частотах приведена в относительных единицах по отношению к энергии упругой деформации на рабочей частоте $f = 5690.1332$ Гц.

Для определения временных зависимостей электрических сигналов на пьезоэлементах было необходимо численно решить смешанную краевую задачу связанных уравнений электроупругости. Её решение позволило определить эволюцию форм колебаний резонатора, временную зависимость потенциалов на пьезоэлементах и оценить время выхода ТВГ на рабочий режим. Из-за ограниченности вычислительных ресурсов используемых ПК (объём оперативной памяти 32 Гб, 8-ядерный процес-

сор с частотой 3.4 ГГц) задача решалась во временном интервале от 0 до 0.015 с.

На рис. 2 показана нумерация точек на пьезоэлементах и торце резонатора, с которых выводилась информация в вычислительных экспериментах.

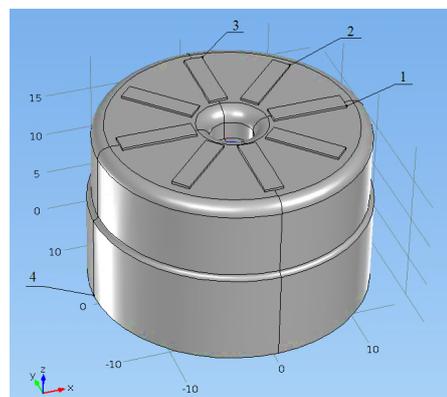


Рис. 2. Нумерация точек на пьезоэлементах и торце резонатора

На рис. 3 показана эволюция формы колебаний резонатора, возбуждаемого переменным синусоидальным напряжением с амплитудой 5 В и рабочей частотой 5690.1332 Гц приложенным к двум противоположным пьезоэлементам, в разные моменты времени.

На рис. 4 показана временная зависимость синусоидального электрического потенциала, приложенного к двум противоположным пьезоэлементам (точка 1).

Из рис. 5 видно, что временная зависимость компонент вектора смещений в точке 1 на начальном этапе представляет собой суперпозицию колебаний с различными собственными частотами, которые с течением времени будут затухать с выделением составляющей, соответствующей рабочей частоте. Амплитуда z -компоненты вектора смещений возрастает с течением времени линейно, тогда как амплитуды x - и y -компонент практически постоянны.

На рис. 6 показана временная зависимость амплитуды генерируемого электрического потенциала на электроде пьезоэлемента (точка 3).

Из рис. 6 видно, что амплитуда генерируемого переменного потенциала растёт линейным образом с увеличением времени возбуждения резонатора и достигает значения 0.08 В при $t = 0.015$ с. Отсюда следует, что для выхода на рабочий режим 5 В в силу линейности роста амплитуды потенциала необходимо время раскачки порядка 1 с. Линейность роста напряжения обусловлена линейностью инерционно-упругого отклика резонатора ТВГ при возбуждении на частотах, близких к рабочей собственной частоте. Вязкость материала резонатора и наличие внешней системы съёма сигнала с пьезоэлементов естественно приведёт к нелинейности роста напряжения и, вследствие этого, к небольшому увеличению времени выхода ТВГ на рабочий режим. Для учёта этого влияния в вычислительных экспериментах необходимо расширение используемой для расчётов математической модели электроупругости.

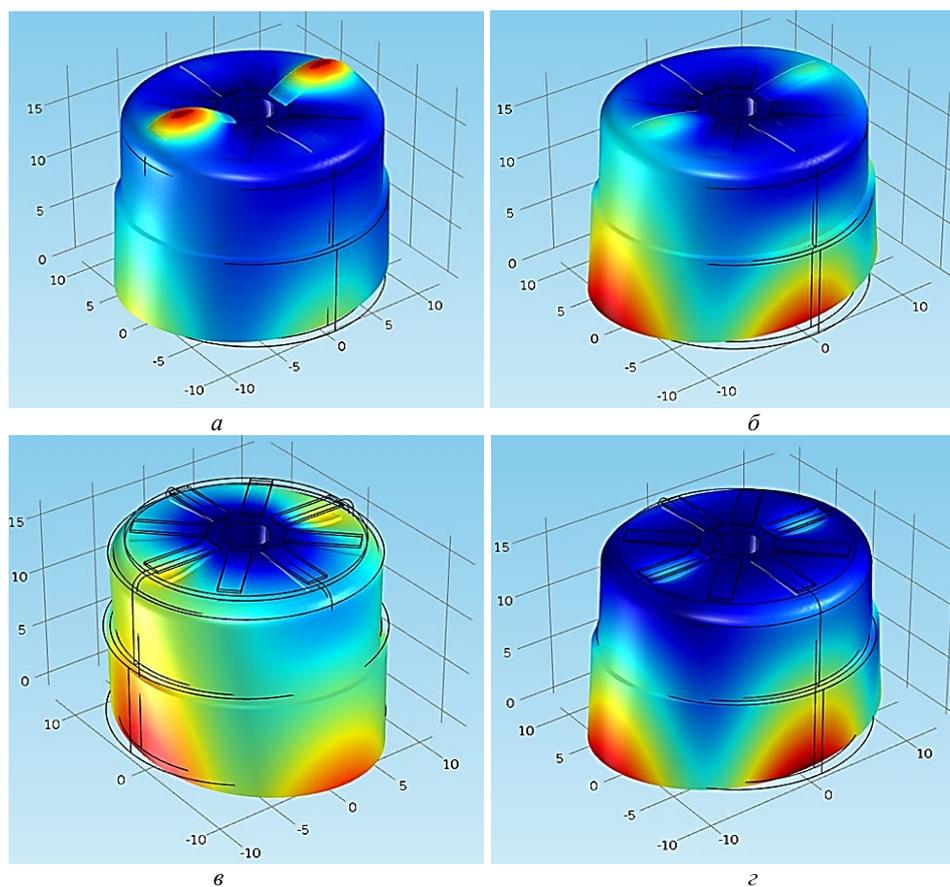


Рис. 3. Формы колебаний резонатора в моменты времени:
а) $t = 0.00019$ с; б) $t = 0.00036$ с; в) $t = 0.00045$ с; г) $t = 0.01337$ с

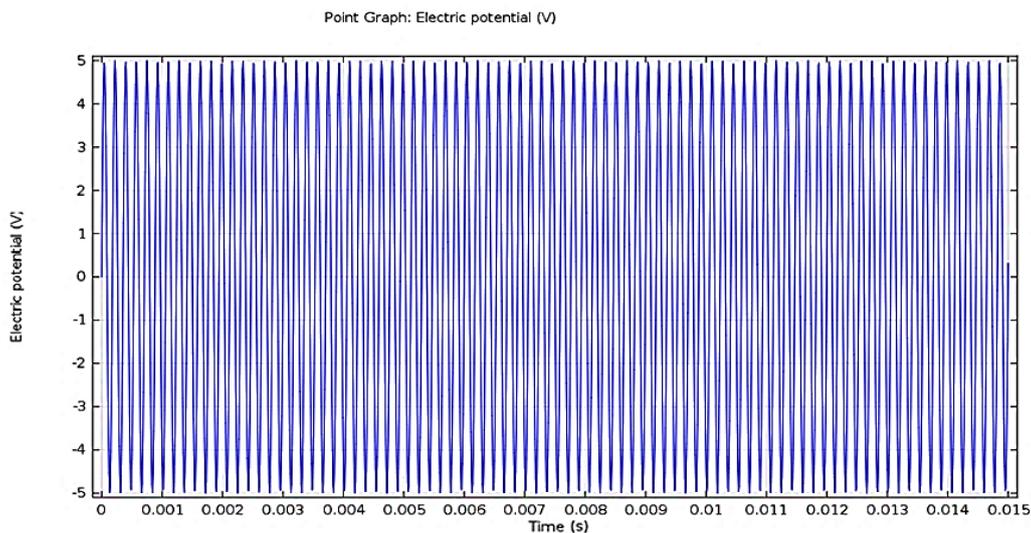


Рис. 4. Синусоидальный электрический потенциал возбуждения резонатора ТВГ на пьезоэлементе 1

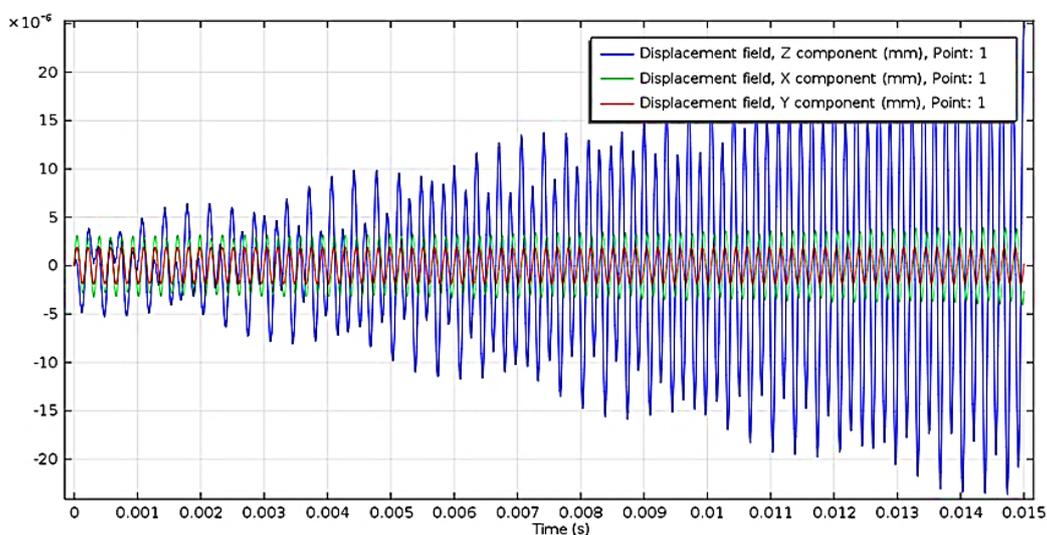


Рис. 5. Временная зависимость компонент вектора смещений резонатора ТВГ в точке 1

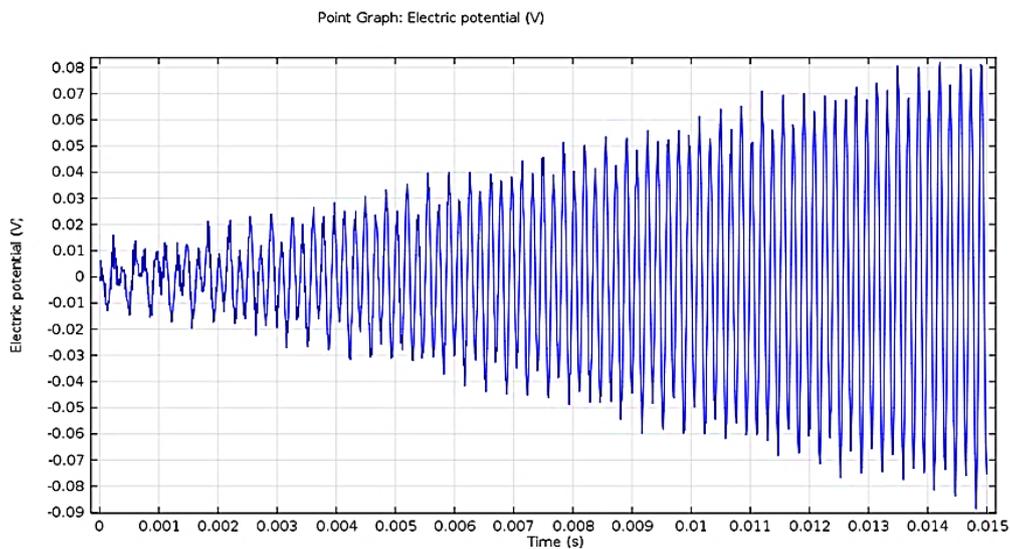


Рис. 6. Временная зависимость потенциала на электроде пьезоэлемента (точка 3)

На рис. 7 показана временная зависимость генерируемого электрического потенциала на электроде приёмного пьезоэлемента (точка 2). Важно отметить, что представленные на этом рисунке результаты показывают уровень неустранимого фонового переменного потенциала (порядка 0.02 В) на приёмных пьезоэлементах, расположенных под углом 45 градусов к пьезоэлементам системы возбуждения. Его величина зависит от размеров пьезоэлементов и их положения на резонаторе. Необходимы дополни-

тельные вычислительные эксперименты по подбору оптимальных значений этих параметров.

На рис. 8 показана временная зависимость компонент вектора смещений в точке 2. Вклад в колебания точек на поверхности приёмного пьезоэлемента вносят все собственные частоты резонатора. В отличие от этого, в колебания точек кромки резонатора (например, точки 4), как видно из рис. 9, преобладает вклад основной рабочей частоты.

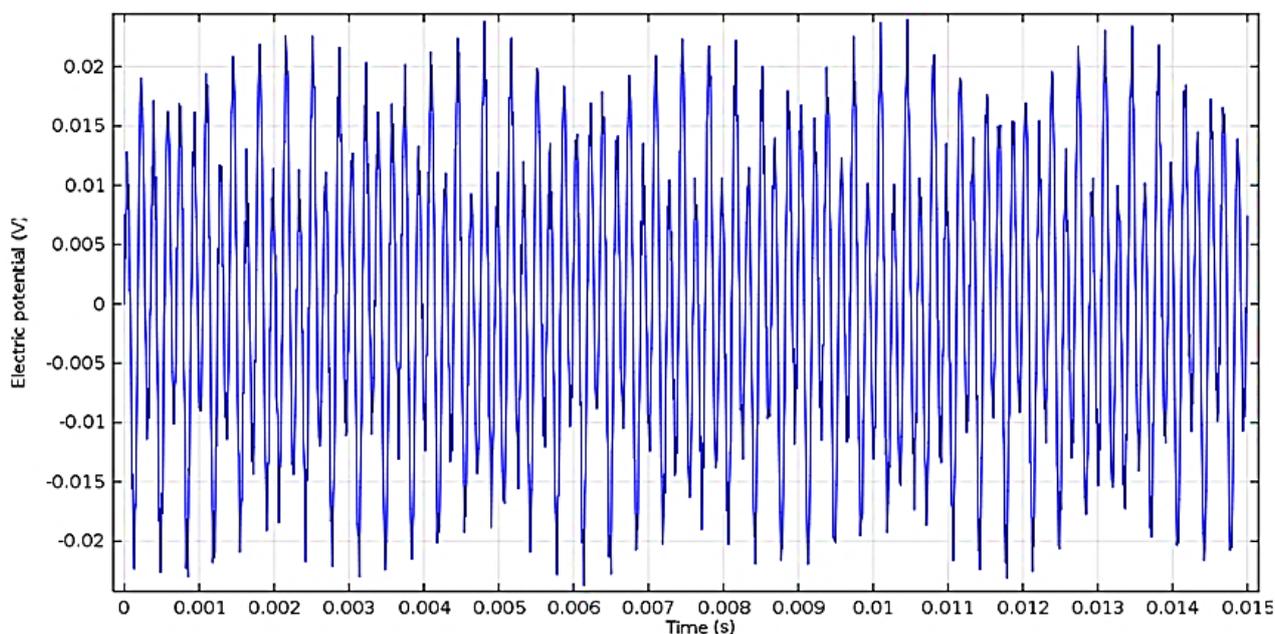


Рис. 7. Временная зависимость потенциала на электроде приёмного пьезоэлемента (точка 2)

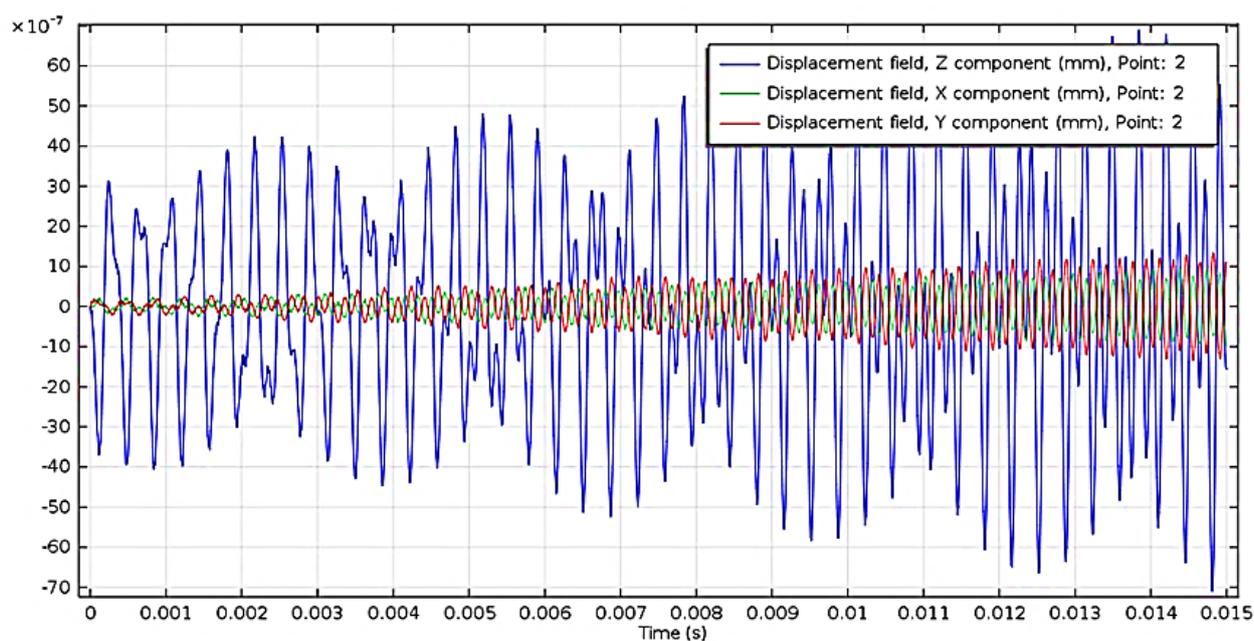


Рис. 8. Временная зависимость компонент вектора смещений резонатора ТВГ в точке 2

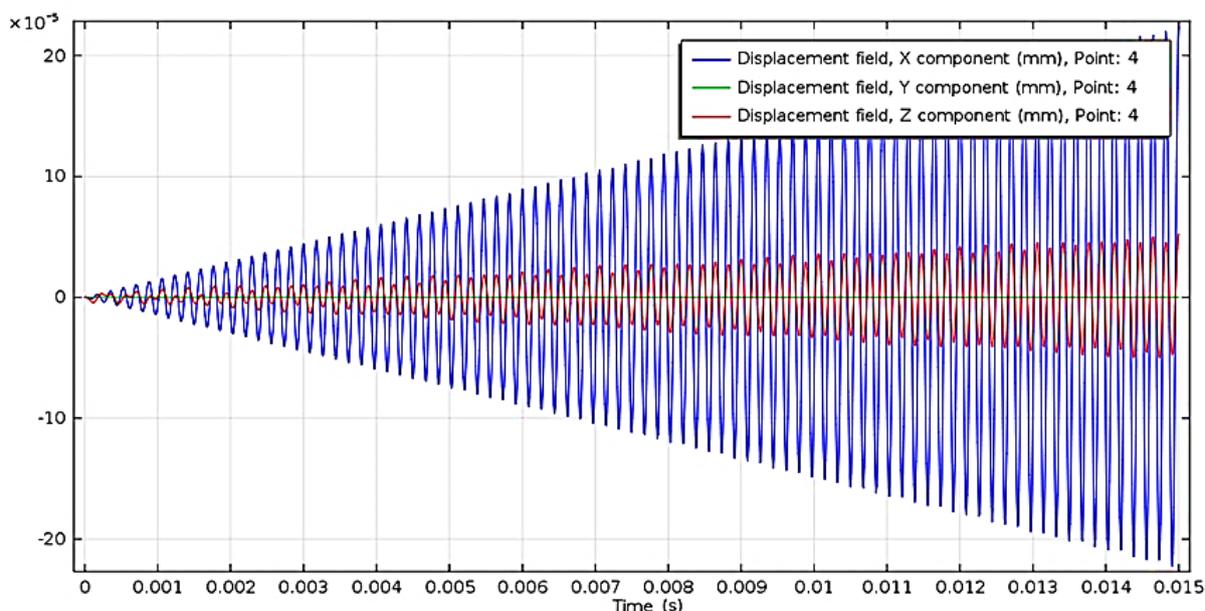


Рис. 9. Временная зависимость компонент вектора смещений резонатора ТВГ в точке 4

Заключение

Проведённое моделирование ТВГ позволило определить:

- минимально возможное время выхода ТВГ на рабочий режим для выбранной конструктивной схемы при заданных параметрах возбуждения;
- неустраняемый фоновый переменный электрический потенциал на электродах пьезоэлементов съёма сигнала.

Эти факторы необходимо учитывать при разработке конструкции резонатора ТВГ и системы съёма и обработки сигнала с пьезоэлементов.

Литература

1. A Set of High Accuracy Low Cost Metallic Resonator CVG / V.V. Chikovani, I.M. Okon, A.S. Barabashov, P. Tewksbury // 2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. Monterey, CA. 2008. P. 238-243.

2. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором / В.Я. Распопов, И.А. Волчихин, А.И. Волчихин и др.; под ред. В. Я. Распопова. Тула: Издательство ТулГУ. 2018. 189 с.

3. Миниатюрные волновые твердотельные гироскопы для малых космических аппаратов / В.А. Матвеев, Б.С. Лунин, М.А. Басараб и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2014. №4. С. 80-96.

4. Влияние пьезоэлектрических преобразователей на собственные частоты резонатора волнового твердотельного гироскопа / И.Л. Батаронов, Г.Е. Шунин, С.А. Кострюков и др. // Известия АН. Серия Физическая. 2019. Т. 83. № 9. С. 1220-1223.

5. Партон В.З., Кудрявцев Б.А. Электромагнитноупругость пьезоэлектрических и проводящих тел. М.: Наука. 1988. 472 с.

6. Система компьютерного моделирования физико-механических процессов в волновом твердотельном гироскопе / И.Л. Батаронов, Г.Е. Шунин, С.А. Кострюков и др. // Физико-математическое моделирование систем: материалы XIX междунар. семинара. Воронеж: ВГТУ. 2018. С. 162-166.

Поступила 21.03.2023; принята к публикации 13.04.2023

Информация об авторах

Батаронов Игорь Леонидович – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики и физико-математического моделирования, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: i-bataronov@mail.ru, тел. +7(473) 246-42-22

Шуний Геннадий Евгеньевич – канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vmfmm@mail.ru, тел. +7(473) 246-42-22, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1035-6858>

Кострюков Сергей Александрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kostry@mail.ru, тел. +7(473) 246-42-22, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8367-6003>

Пешков Вадим Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pvv-vrn@mail.ru, тел. +7-915-580-94-00, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9331-5623>

SIMULATION OF ELECTROMECHANICAL PROCESSES IN A SOLID-STATE WAVE GYROSCOPE WITH PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS

I.L. Bataronov, G.E. Shunin, S.A. Kostryukov, V.V. Peshkov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the eigenvalue problem and the mixed boundary value problem for the electroelasticity equations describing oscillations of the cylindrical resonator of a solid-state wave gyroscope with piezoelectric transducers was solved numerically. The developed integrated system of finite element analysis of gravity inertial sensors was used for the solution. The natural frequency spectrum, elastic strain energy, and dissipative characteristics of an oscillating resonator are calculated. The evolution of the oscillation form of a resonator excited by an alternating sinusoidal voltage of a given amplitude at the operating frequency of the resonator applied to two opposite piezoelectric elements at different times is shown. The spectrum of natural frequencies, the energy and dissipative characteristics of the oscillating resonator, the time dependence of the electric potential on the piezoelectric elements, the level of the background alternating voltage on the receiving piezoelements located at an angle of 45 degrees to the piezoelectric elements of the excitation system are determined. An estimate of the time it takes for a solid-state wave gyroscope to reach its operating mode was carried out. These factors should be taken into account when choosing the design of the resonator and the system for removing and processing the signal from the piezoelectric elements of the gyroscope

Key words: solid-state wave gyroscope, cylindrical resonator, electroelasticity equations, mixed boundary value problem, eigenvalue problem, finite element analysis

References

1. Chikovani V.V., Okon I.M., Barabashov A.S., Tewksbury P. "A Set of High Accuracy Low Cost Metallic Resonator CVG" 2008 *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, Monterey, CA*, 2008, pp. 238-243.
2. Raspopov V.Ya., Volchikhin I.A., Volchikhin A.I., etc. "Wave solid-state gyroscope with a metal resonator" ("Volnovoy tverdotel'nyy giroskop s metallicheskim rezonatorom"), Tula: TulGU, 2018, 189 p.
3. Basarab M.A., Lunin B.S., Matveev V.A., Fomichev A.V., Chumankin E.A., Yurin A.V. "Miniature gyroscope based on elastic waves in solids for small spacecraft", *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering (Vestnik MGTU im. Baumana. Ser. "Priborostroenie")*, 2014, no. 4, pp. 80-96.
4. Bataronov I.L., Shunin G.E., Kostryukov S.A., Peshkov V.V., Pisarev S.A. "Effect of Piezoelectric Transducers on the Resonator Frequencies of a Hemispherical Resonator Gyroscope" *The Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics (Izvestiya AN. Seriya Fizicheskaya)*, 2019, vol. 83, no. 9, pp. 1110-1113.
5. Parton V.Z., Kudryavtsev B.A. "Electromagnetoelasticity of piezoelectric and conducting bodies" (Electromagnitoupругost' p'ezoelektricheskikh i provodyaschih tel), Moscow: Nauka, 1988, 472 p.
6. Bataronov I.L., Shunin G.E., Kostryukov S.A., Peshkov V.V., Pisarev S.V. "System of physical-mechanical processes computer simulation in a wave solid-state gyroscope" *Proc. of XIX Int. Sem.: Physical and mathematical modeling of systems (Fiziko-matematicheskoe modelirovanie sistem)*, Voronezh, 2018, pp. 162-166.

Submitted 21.03.2023; revised 13.04.2023

Information about the authors

Igor L. Bataronov, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Higher Mathematics and Physical and Mathematical Modeling, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: i-bataronov@mail.ru, tel. +7(473) 246-42-22

Genady E. Shunin, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Senior researcher, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vmfmm@mail.ru, tel. +7(473) 246-42-22, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1035-6858>

Sergey A. Kostryukov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kostry@mail.ru, tel. +7(473) 246-42-22

Vadim V. Peshkov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pvv-vrn@mail.ru, tel. +7-915-580-94-00, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9331-5623>

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ОБЪЕКТА НЕДВИЖИМОСТИ МЕТОДАМИ ПРОГРАММНОЙ ИНЖЕНЕРИИ

О.В. Курипта, Ю.А. Воробьева, О.В. Минакова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: экологическая безопасность недвижимости как наука получила развитие при оценке качества среды обитания человека. Представленное программное приложение позволяет не только провести такую оценку, но и помочь пользователю определить, какие именно мероприятия необходимо провести для повышения класса устойчивости среды обитания. Реализован модуль поддержки принятия решений на основе проведенной оценки среды обитания, помогающий пользователю оценить возможные варианты для повышения экологической безопасности. Реализация программного приложения осуществлена средствами языка программирования С# в среде разработки Microsoft Visual Studio 2017, формат хранения настроек программы – JSON. Система управления базой данных - Microsoft SQL Server. Программное приложение позволяет осуществлять заполнение первичной экологической оценки, проводить расчет класса устойчивости среды обитания, выводить перечень мероприятий по повышению класса устойчивости, перерасчет первичной экологической оценки, импорт и экспорт файла сессии, а также сохранение отчета в текстовом формате. В программном приложении реализована функция помощи в принятии решений, цель которой осведомить пользователя о критериях, которые необходимо изменить и улучшить на объекте недвижимости

Ключевые слова: программное приложение, экологическая оценка, устойчивость среды обитания

Введение

В настоящее время в сфере недвижимости одними из основных вопросов остается вопрос по учету экологической экспертизы. Экологическая оценка — это процесс систематического анализа и оценки экологических последствий жизнедеятельности объектов недвижимости, консультаций с заинтересованными сторонами, а также учет результатов этого анализа и консультаций в планировании, проектировании, утверждении и осуществлении мероприятий по повышению оценки [1-3].

Общий процесс проведения экологической оценки включает в себя следующие этапы:

- определение необходимости экологической оценки;
- постановка задач и планирование;
- анализ воздействий (выявление, анализ и прогноз воздействий, значимость воздействий);
- разработка мероприятий по нейтрализации воздействий (управление воздействием);
- подготовка итогового документа;
- оценка полноты и качества экспертизы (качество документации, комментарии заинтересованных сторон, приемлемость намеченных мер);
- принятие решения;
- мониторинг и контроль воздействия.

При экологическом обследовании состояния здания получаемая информация должна быть достаточной для проведения вариантного проектирования реконструкции или капитального ремонта объекта. Именно экологическая оценка недвижимости поможет выявить фактическое положение относительно экологичности и устойчивости среды обитания интересующего объекта недвижимости.

Цель работы автоматизировать и усовершенствовать процесс расчета оценки и принятия решения по экологической устойчивости объектов недвижимости методами программной инженерии.

Задачи исследования:

- анализ существующих программных средств, позволяющих одновременно рассчитывать экологическую оценку объектов недвижимости и определять класс устойчивости среды обитания;
- разработать программное приложение, в основе которого заложена методика оценки устойчивости среды обитания.

Постановка задачи

Комфортность и устойчивость среды обитания в оценке недвижимости существенно влияют на стоимость объекта. На практике в оценке недвижимости четких и понятных классификаций факторов окружающей среды еще не сложилось. Такая ситуация объясняется тем, что это направление только формируется и охватывает широкий круг вопросов. Для экологической

гической оценки необходимо изучение качественного состояния объекта недвижимости при условии полного раскрытия каждого компонента.

В работе принято во внимание также возможное влияние объекта недвижимости на здоровье человека, исторические и культурные ценности и социально-экономические условия. Результаты оценки недвижимости рассмотрены не только в количественных величинах, но и с точки зрения их значимости. Необходимо изучение возможных мер для всех вариантов, рассматриваемых в экологической оценке, чтобы обеспечить возможность их сравнения и выбора наиболее приемлемых альтернатив для уменьшения негативного последствия [4-7].

Эффективность экологической оценки зависит от того, насколько хорошо учитываются выводы оценки не только при реализации запланированных мероприятий, но и при осуществлении намеченных мер по уменьшению негативных последствий. Поэтому в современных системах экологической оценки большое внимание акцентируется на процессах, происходящих после утверждения результата. С этой целью в документацию включаются планы экологического управления, в которых описываются, как будут реализованы меры по смягчению последствий негативных воздействий.

Система измерений факторов объектов недвижимости сложна, исходя из субъективной основы их ценности. Наиболее объективный взгляд на экологические факторы и устойчивость среды обитания имеет концепция «зеленое строительство» [8, 9].

Анализ существующих программных приложений по данной предметной области, показал, что существующие web-приложения и программные продукты не позволяют одновременно рассчитывать экологическую оценку объектов недвижимости и определять класс устойчивости среды обитания [10-12].

Выбор метода архитектурного анализа

В данной работе представлен процесс разработки и пример работы программного приложения, в основе которого заложена методика оценки устойчивости среды обитания. Она включает помимо перечня критериев и баллов способы определения балльных эквивалентов параметров, источники и методы получения исходных данных, а также ссылки на соответствующие нормативно-правовые акты.

В контексте разрабатываемого программного приложения стоит задача автоматизировать и усовершенствовать процесс расчета оценки и принятия решения по экологической устойчивости объектов недвижимости методами программной инженерии.

Программное приложение построено на клиент-серверной архитектуре и поддерживает следующие группы участников:

1) авторизованный пользователь – доступны все функции программного приложения, такие как расчет первичной оценки, перерасчет оценки, сохранение отчета в текстовом формате, экспорт файла сессии в формате Json, получение рекомендаций по повышению оценки. Данные зарегистрированных пользователей сохраняются в базу данных на сервере для отображения списка сессий пользователя в программном приложении, также эти данные можно использовать для анализа данных и аналитических расчетов;

2) неавторизованный пользователь – доступны все функции приложения без потери работоспособности. Данные неавторизованного пользователя не сохраняются в базе данных на сервере. Соответственно, чтобы провести повторную оценку необходимо заранее произвести экспорт файла сессии и при необходимости импортировать его в программное приложение.

Основные варианты использования приложения приведены на диаграмме прецедентов (рис. 1). К ним относятся: регистрация и авторизация, экспорт и импорт файла сессии, взаимодействие с категориями и критериями, взаимодействие с предложенными мероприятиями, перерасчет оценки, сохранение отчета в текстовом формате.

При открытии программного приложения пользователю предлагается пройти одноэтапную авторизацию или открыть главное окно работы с расчетами. После авторизации при открытии главного окна доступны поля с выбором созданных ранее сессий или можно импортировать файл сессии первичного расчета. Если сохраненных сессий у пользователя нет, то можно создать новую.

При создании новой сессии пользователю становятся доступны оценочные категории и критерии. Оценка в каждой критерии устанавливается пользователем с помощью радиокнопки. После установления радиокнопкой ответов на все критерии и нажатия на кнопку «Рассчитать» пользователю отображается результат расчета.

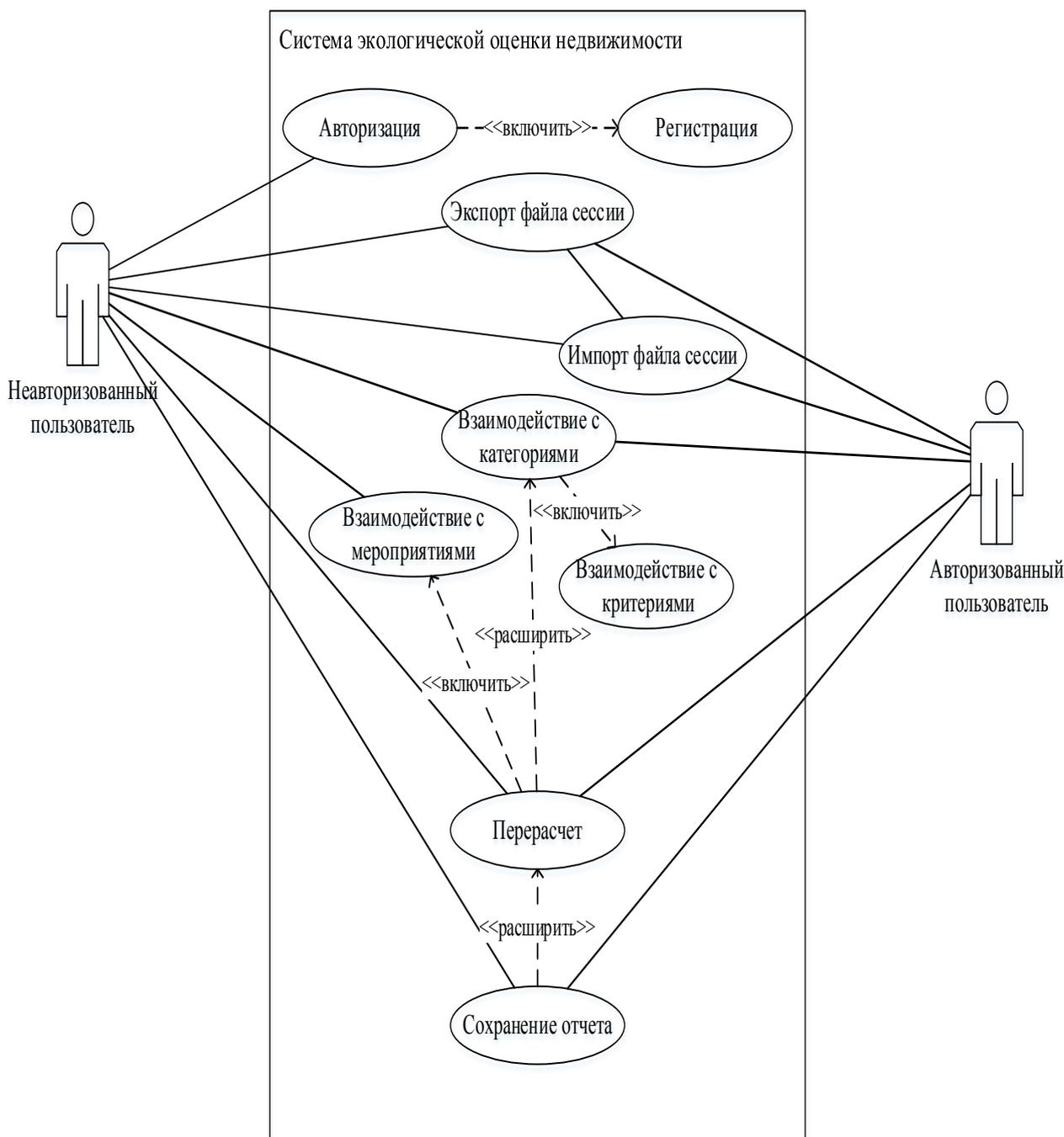


Рис. 1. Диаграмма прецедентов программного приложения

Результат расчета оценки содержит мероприятия по повышению класса устойчивости, а также общий балл проведенной оценки и соответствующего класса устойчивости среды обитания объекта недвижимости. Пользователь может увидеть предлагаемые программным приложением мероприятия по повышению класса устойчивости и сохранить сессию в приложении. При необходимости можно экспортировать отчет экологической оценки.

Практическое решение

Процесс помощи в принятии решений имеет следующие возможности:

скрыть заполненные показатели – необходимо, чтобы пользователь увидел показатели, на которые не поставил ответ;

выделить показатели с низкой оценкой – выбрав данный пункт, программа отфильтрует показатели с самым низким баллом;

выделить показатели с оценкой ниже среднего арифметического – необходимо, чтобы отобразить показатели с низкой оценкой относительно всех показателей в данной категории.

Модуль расчетов реализует функции необходимые для вычисления экологической оценки и класса устойчивости среды обитания. В программном приложении доступно 10 категорий. При открытии каждой категории становятся доступны критерии соответствующей категории. Для каждого критерия определены несколько вариантов ответа, в зависимости от того какой ответ выбирает пользователь ставятся различные баллы за критерий.

Программный модуль помощи в принятии решений, который позволяет пользователю не просто провести экологическую оценку, но и понять какие именно мероприятия необходимо провести, чтобы улучшить класс устойчивости среды обитания.

После установления радиокнопки в категориях и их критериях пользователь нажимает кнопку для вывода результата. Если не на все критерии установлен ответ, то приложение выведет окно, предупреждающее пользователя о наличии вопросов без ответа. Далее пользователь имеет два варианта действий:

- продолжить расчет с пропущенными показателями;
- нажать на кнопку для отображения незаполненных показателей и ответить на пропущенные вопросы.

После заполнения пропущенных критериев и активации расчета посредством кнопки происходит подсчет общего суммарного балла.

Если общий бал имеет оценку ниже 530 баллов, программное приложение выводит на экран таблицу, которая содержит:

- список всех показателей с минимальными оценками, сгруппированных по их категориям;
- балл каждого показателя с минимальной оценкой и его процент от максимального балла.
- общий суммарный балл и его процент от максимальных 530 баллов.

Для удобного восприятия информации в программном приложении имеется возможность подсветить категории в результирующей таблице разными цветами в зависимости от их

балла. Красным цветом в приложении окрашиваются критерии, ответы на которые имеют самый низкий балл – таким образом, пользователь понимает какие именно работы и мероприятия необходимо провести, чтобы повысить общую оценку объекта.

Оранжевым цветом окрашиваются показатели с ответом ниже среднего арифметического – необходимо для того, чтобы пользователь понимал насколько данный балл низок в рамках рассматриваемой категории, а не всей экологической оценки. Чтобы посчитать средний балл суммируются все баллы по показателям, которые выбрал пользователь и делятся на количество показателей в категории. В каждой категории может быть разное количество показателей.

Зеленым цветом отображаются категории с высоким и/или выше среднего баллом.

На рис. 2 представлена блок – схема описывающая процесс расчета экологической оценки с точки зрения разработчика.

Для каждого критерия определен свой балл оценивания в соответствии со стандартом. В зависимости от того какой вариант ответа выберет пользователь соответствующему критерию присваивается определенный балл.

Таким образом, процесс помощи в принятии решений реализуется следующими способами:

- ищет категории показателей, в которых есть незаполненные ответы – программное приложение проверяет, на каких показателях не установлен радиобаттон и выводит их на экран;
- скрывает уже заполненные показатели – программное приложение проверяет, на каких показателях установлен радиобаттон и скрывает их;
- подкрашивает разными цветами показатели с низким баллом и показатели с баллом ниже среднего.

Если все показатели заполнены, можно приступить к расчету класса устойчивости среды обитания. Для этого необходимо нажать кнопку «Рассчитать», расположенную на панели. Если не все категории заполнены полностью, приложение сообщит об этом пользователю и предложит прервать процесс расчета для дозаполнения данных.

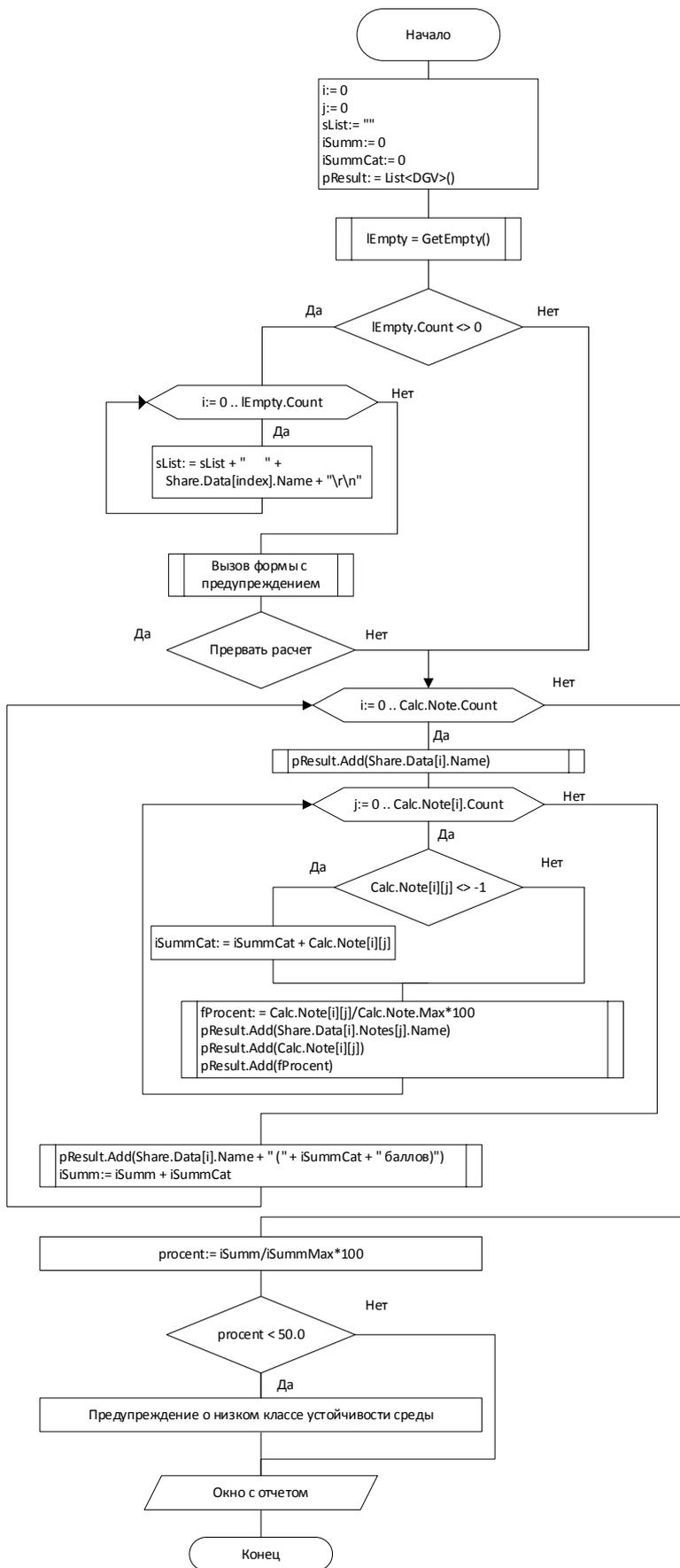


Рис. 2. Блок – схема расчета экологической оценки

Если класс устойчивости среды обитания будет недостаточно высок, приложение сообщит об этом (рис. 3) и предложит еще раз проверить свои оценки на предмет заниженности.

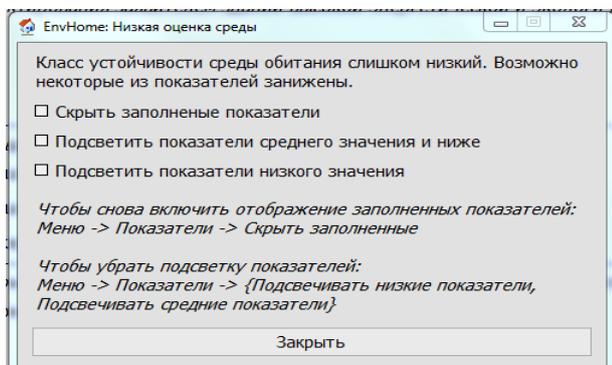


Рис. 3. Информирование о низком классе устойчивости среды обитания

В помощь приложение предложит выделить разными цветами табличные показатели, оценки которых низкие, и/или подсветить показатели, оценки которых ниже среднего, кликнув в информационном окне по соответствующим галочкам «Подсветить показатели среднего значения и ниже» и «Подсветить показатели низкого значения» (рис. 4).

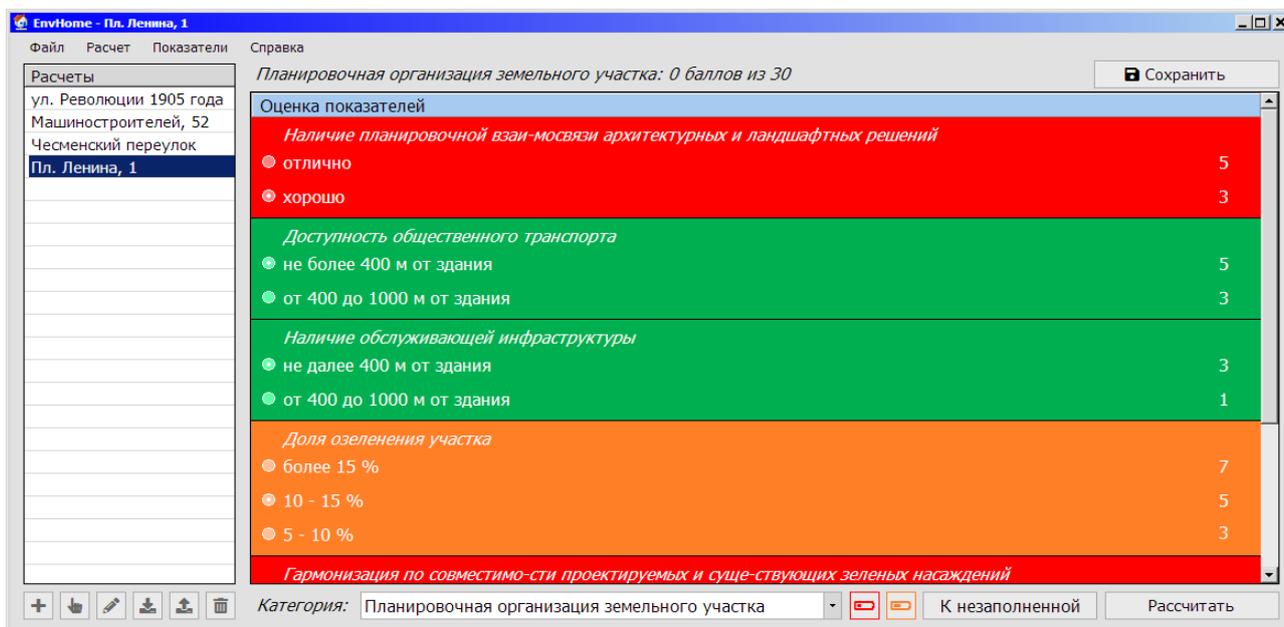


Рис. 4. Подсветка показателей

Если все показатели всех категорий точно заполнены, то при нажатии на кнопку «Рассчитать», пользователь получит отчет. В отчете будет отображаться информация о классе устойчивости среды обитания, общий суммарный балл по всем категориям, максимальный суммарный балл по всем категориям, а также процент текущего балла от максимального значения.

В таблице отчета будет отображаться список всех показателей, сгруппированных по их категориям, балл каждого показателя и его процент от максимального балла. Также и для категории будет отображаться ее общий суммарный балл и процент от максимального балла.

В окне отчета располагается кнопка «Экспортировать в MS «Word»», нажав на которую, пользователь получит возможность сохранить отчет в виде документа.

Заключение

Представленный программный инструмент, позволяющий на основе проведенного обследования объекта оценить его устойчивость среды обитания и принять перечень мероприятий по уменьшению негативных воздействий на окружающую среду.

Практическая значимость заключается в применении разработанного программного ин-

струментария при контроле компаний уполномоченных на проведение экологической оценки, а также для частного использования пользователями, желающими узнать экологическую оценку своей или приобретаемой недвижимости. Разработанное программное приложение не может заменить аудита или сертификацию. Однако важнейшая роль программного приложения в том, что оно дает полноценное первичное представление о компонентах энергосбережения и экологичности здания. Пользователь сможет принять решение о повышении энергоэффективности здания или "зеленой" сертификации.

Таким образом, при использовании данного программного приложения для расчета экологической оценки объектов недвижимости не только сокращается время для вычисления результатов, и исчезают риски ошибочного вычисления баллов, но и становится понятным, какие именно критерии требуют особого внимания и проработки на объекте недвижимости.

Литература

1. Гурьева М.А. Взаимозависимость концепций "зеленой экономики", устойчивого развития, экологического освоения экономического пространства// Глобальный научный потенциал. 2016, №5 (62). С. 46-55.
2. Зарубина А.П., Толпышева Т.Ю., Сорокина Е.В. Экоотоксикологическая оценка состояния городской среды на примере мегаполиса Москва// Социально-экологические технологии. 2018 № 2, С. 34-51.
3. Корниенко С.Т. Энергоэффективность, экологическая безопасность, экономическая эффективность - приоритетные задачи "зеленого" строительства// Вестник Волгоградского государственного архитектурно-

строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017 № 49 (68). С. 167-177.

4. Шарифуллина А.Р., Хромова А.О. Оценка устойчивости внешней и внутренней среды здания в соответствии со стандартами зеленого строительства //Синергия наук. 2017. № 11. С. 951-959.

5. Дегтев И.А., Тарасенко В.Н., Хуркова Д.А. Основные принципы формирования доступного жилого пространства в "зеленом" строительстве// Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 12. С. 35-39.

6. Шепс Р.А., Щукина Т.В., Воробьева Ю.А., Ишков А.Н. Влияние городских магистралей на придорожные деревья //Международная научно-практическая конференция "Обеспечение устойчивого развития в контексте сельского хозяйства, зеленой энергетики, экологии и наук о Земле" - Экология и защита окружающей среды". 2021. С. 042052

7. Черемисинов А.А., Черемисинов А.Ю. Анализ некоторых характеристик динамических систем экологического менеджмента//Модели и технологии экологического менеджмента (региональный аспект). 2017. №2. С. 10-20.

8. Лидерство в области энергетического и экологического проектирования, USGBC LEED, 2009 (v3)

9. Международный стандарт метода экологической оценки здания исследовательского учреждения, BREEAM.

10. Курипта О.В., Попова Е.А., Осипова С.А. Концептуальные аспекты проектирования программного приложения расчета класса устойчивости среды обитания для объектов недвижимости // Техника и технологии: пути инновационного развития. Сборник научных трудов 10-й Международной научно-практической конференции. Курск, 2021. С. 125-132.

11. Рихтер, Джеффри CLR via C#. Программирование на платформе Microsoft .NET Framework 2.0 на языке C#; Питер, 2007. 656 с.

12. Вагнер, Билл C# Эффективное программирование / Билл Вагнер. М.: ЛОРИ, 2017. 320 с.

Поступила 01.03.2023; принята к публикации 14.04.2023

Информация об авторах

Курипта Оксана Валериевна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kuripta-oksana@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1317-4395>

Воробьева Юлия Александровна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: cccp38@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6488-5966>

Минакова Ольга Владимировна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: olgmina@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0641-731X>

IMPROVING THE ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF A REAL ESTATE OBJECT BY SOFTWARE ENGINEERING METHODS

O.V. Kuripta, Yu.A. Vorob'eva, O.V. Minakova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: environmental safety of real estate as a science has been developed in assessing the quality of human habitat. The presented software application allows not only to carry out such an assessment, but also to help the user determine exactly what activities need to be carried out to increase the sustainability class of the habitat. The work implements a decision support module based on the conducted habitat assessment, which helps the user to evaluate possible options for improving environmental safety. The software application is implemented using the C# programming language in the Microsoft Visual Studio 2017 development environment, the format for storing program settings is JSON. The database management system is Microsoft SQL Server. The software application allows you to fill out the primary environmental assessment, calculate the sustainability class of the habitat, display a list of measures to improve the sustainability class, recalculate the primary environmental assessment, import and export the session file and save the report in text format. The software application also implements a decision-making assistance function, the purpose of which is to inform the user about the criteria that need to be changed and improved on the property

Key words: software application, environmental assessment, habitat sustainability

References

1. Gurieva M.A. "Interdependence of the concepts of "green economy", sustainable development, ecological development of the economic space", *Global scientific potential (Global'nyy nauchnyy potentsial)*, 2016, no. 5 (62), pp. 46-55.
2. Zarubina A.P., Tolpysheva T.Yu., Sorokina E.V. "Ecotoxicological assessment of the state of the urban environment on the example of the megalopolis of Moscow", *Socio-ecological technologies (Sotsial'no-ekologicheskiye tekhnologii)*, 2018, no. 2, pp. 34-51.
3. Kornienko S.T. "Energy efficiency, environmental safety, economic efficiency - priority tasks of "green" construction", *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture (Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya Stroitel'stvo i arkhitektura)*, 2017, no. 49 (68), pp. 167-177.
4. Sharifullina A.R., Khromova A.O. "Assessment of the sustainability of the external and internal environment of the building in accordance with the standards of green construction", *Synergy of Sciences (Sinergiya nauk)*, 2017, no. 11, pp. 951-959.
5. Degtev I.A., V.N. Tarasenko, Khurkova D.A. "Basic principles of formation of affordable living space in "green" construction", *Bulletin of Belgorod State Technological University (Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta)*, 2016, no. 12, pp. 35-39.
6. Sheps R.A., Shchukina T.V., Vorobieva Yu.A., Ishkov A. "The impact of urban highways on roadside trees", *International scientific conference "Ensuring sustainable development in the context of agriculture, green energy, ecology and earth science" - ecology and environment protection*, 2021, p. 042052
7. Cheremisinov A.A., Cheremisinov A. Yu. "Analysis of some characteristics of dynamic environmental management systems", *Models and technologies of environmental management (regional aspect) (Modeli i tekhnologii ekologicheskogo menedzhmenta (regional'nyy aspekt))*, 2017, no. 2, pp. 10-20.
8. Leadership in Energy and Environmental Design, USGBC LEED, 2009 (vol. 3).
9. Building Research Establishment Environmental Assessment Method International standard, BREEAM.
10. Kuripta O.V., Popova E.A., Osipova S.A. "Conceptual aspects of designing a software application for calculating the sustainability class of the habitat for real estate objects", *Technics and technologies: ways of innovative development (Tekhnika i tekhnologii: puti innovatsionnogo razvitiya)*, Kursk, 2021, pp. 125-132.
11. Richter J. "CLR via C#. Programming on the Microsoft platform .NET Framework 2.0 in C#", S.-Petersburg: Piter, 2007.
12. Wagner B. "C # Effective programming", Moscow: LORI, 2017.

Submitted 01.03.2023; revised 14.04.2023

Information about the authors

Oksana V. Kuripta, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Str, Voronezh 394006, Russia), e-mail: kuripta-okcana@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1317-4395>

Julia A. Vorob'eva, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Str, Voronezh 394006, Russia), e-mail: cccp38@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6488-5966>

Olga V. Minakova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Str, Voronezh 394006, Russia), e-mail: olgmina@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0641-731X>

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПРОИЗВОДСТВОМ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК С ЗАДАНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Е.А. Буракова

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия

Аннотация: рассматривается концепция управления промышленным производством углеродных нанотрубок (УНТ) с заданными параметрами CVD методом, основанная на новом подходе к управлению производственной системой и учете управляющих факторов, предусмотренных введением дополнительных стадий обработки катализатора физическим воздействием. На основе данной концепции разработана и реализована методология поддержки принятия решений при промышленном производстве УНТ с заданными параметрами, которая позволила создать информационную систему (ИС), обеспечивающую технолога информацией о составе и условиях обработки катализатора физическим воздействием, способствующих реализации синтеза наноструктур с параметрами, значения которых наиболее близки к заданным. Использование ИС в производственном процессе способствует существенному снижению затрат времени и ресурсов, вызванных необходимостью проведения дополнительных экспериментов с целью установления условий получения катализатора, обеспечивающего реализацию синтеза УНТ с заданными параметрами. Установлено, что введение в технологическую систему производства УНТ дополнительных компонентов (системы поддержки принятия решений и технологических стадий обработки катализатора физическим воздействием) дает возможность системе, не меняя условия синтеза наноструктур, оперативно переходить к получению наноструктур с требуемыми значениями параметров, отличными от ранее выпускаемых

Ключевые слова: поддержка принятия решений, методология, управление, информационная система, производство углеродных нанотрубок

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-23-01072)

Введение

Уникальные геометрические, тепло- и электрофизические характеристики УНТ определили современные области их практического применения. Они широко используются в качестве модифицирующих добавок в материалы специального назначения [1, 2]. Внесение их в полимерные материалы позволяет повысить тепло- и электропроводность полимеров, в радио- и светопоглощающие материалы - интенсифицировать поглощение энергии электромагнитных излучений в требуемых частотных диапазонах. В основе этих и других эффектов лежат такие физические явления, протекающие в УНТ, как поверхностный и объемный плазмонный резонанс, фононный резонанс, свободный пробег носителей заряда, квантовые взаимодействия. Условием протекания данных явлений на определенных частотах являются соответствующие геометрические и структурные параметры углеродных волокнистых наноматериалов: внешний и внутренний диаметры, длина, отсутствие дефектов и дислокаций, коаксиальная структура.

Наиболее применяемый в настоящее время для промышленного производства углеродных наноматериалов CVD метод при традиционной своей реализации не позволяет получать УНТ с точным соответствием основных их параметров заранее заданным значениям. Это обусловлено сложностью и недостаточной изученностью процессов синтеза нанотрубок на частицах металлического катализатора. Однако известно, что на параметры синтезируемой УНТ влияет не только размер активной частицы катализатора, но и параметры ее кристаллической решетки, а также пространственная ориентация наночастицы по отношению к носителю катализатора. Как правило, эти факторы носят во многом случайный характер и в настоящее время не могут быть учтены при организации производства УНТ с заранее заданными значениями параметров. Несмотря на это, при организации производства УНТ с заданными параметрами особое внимание уделяется составу и условиям получения катализатора.

Подбор состава катализатора, обеспечивающего синтез УНТ с параметрами, значения которых наиболее близки к заданным, как правило, осуществляют эмпирически, что требует существенных затрат времени и ресурсов. Такой подход к организации производства нано-

структур сдерживает развитие наноиндустрии, так как для каждой области применения необходимы УНТ с соответствующими значениями основных параметров.

С целью минимизации затрат, вызванных решением проблемы реализации синтеза УНТ с заданными значениями параметров была разработана система управления, позволяющая существующему производству оперативно перейти на выпуск УНТ с новыми требуемыми параметрами. Система управления подразумевает включение в производственную систему УНТ дополнительных элементов - стадий обработки катализатора и ИС, которая позволяет, не проводя дополнительные эксперименты, определять состав и условия получения катализатора, в том числе тип обработки его физическим воздействием, обеспечивающие формирование УНТ с параметрами, значения которых наиболее близки к заданным.

Методология поддержки принятия решений при производстве УНТ с заданными параметрами

Так как геометрические и структурные параметры УНТ определяются свойствами частиц металлического катализатора [3, 4], то управление целесообразно осуществлять уже на стадиях формирования катализатора. На основе впервые выдвинутой и экспериментально подтвержденной автором гипотезы о возможности управления параметрами синтезируемых УНТ на стадии обработки катализатора физическим воздействием был предложен новый подход к управлению производственной системой. Он заключался в реализации дополнительных стадий - пред- и посттермической обработки катализатора физическим воздействием.

В соответствии с предложенным подходом процесс получения катализатора методом термического разложения солей для синтеза УНТ отличается от классической его реализации наличием дополнительно введенной стадии обработки раствора его исходных компонентов физическим воздействием. В работе исследовано влияние условий обработки раствора исходных компонентов катализатора ультразвуковым, электромагнитным, в т.ч. микроволновым и высокотемпературным воздействием.

Установлено, что указанные воздействия влияют на структуру ионных комплексов [5], образующихся в растворе исходных компонентов катализатора, фазовый состав и степень окисления частиц катализатора. Предполагает-

ся, что наблюдаемые в результате воздействия изменения в свойствах катализатора могут быть вызваны изменением размеров, количества и пространственной ориентации наночастиц металлического катализатора.

Обобщение результатов проведенных обширных экспериментальных исследований позволило разработать концепцию управления промышленным производством УНТ с заданными параметрами, основанную на новом подходе к управлению системой их производства и учете новых управляющих факторов, предусмотренных дополнительной обработкой катализатора.

Данная концепция была положена в основу методологии поддержки принятия решений при промышленном производстве УНТ с заданными параметрами, которая включает в себя следующие этапы:

- определение источников, содержащих информацию, необходимую для формирования базы данных (нормативная документация; источники, содержащие информацию о технологических стадиях, режимах реализации процессов, характеристиках используемого оборудования; о составе используемого в производстве сырья и др.).

- формирование на основе установленных источников баз данных, предусматривающих свое расширение за счет появления новой информации в данной предметной области.

- формирование базы функциональных связей, представляющих в соответствии с разработанным подходом к управлению рассматриваемой производственной системой, аппроксимационные зависимости параметров синтезированных УНТ от управляющих факторов.

- постановка задачи оптимизации условий получения катализатора, обеспечивающего синтез УНТ с заданными параметрами.

- разработка интерфейса, обеспечивающего взаимодействие технолога – лица, принимающего решение (ЛПР), и системы поддержки принятия решений (СППР).

Первые два этапа представляют собой типовые действия по обработке технической и нормативной документации предприятия. Последние три этапа выполняются на основе разработанной в рамках данной работы концепции управления производством УНТ.

Так как согласно предложенной концепции управление параметрами УНТ осуществляется на стадии получения катализатора, то для формирования базы функциональных связей опре-

делен состав информационных потоков ключевых стадий производственной системы (рис. 1).

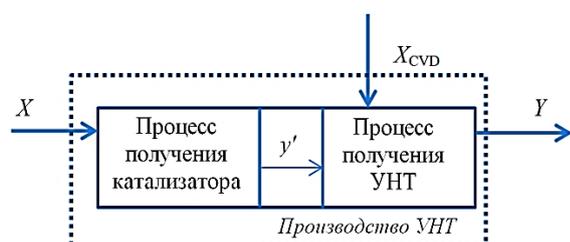


Рис. 1. Информационные потоки производства УНТ

Было установлено, что входной информационный поток процесса получения катализатора X представляет собой набор данных, характеризующих актуальные входные, управляющие и возмущающие факторы:

$$X = \langle C, \omega_{\text{air}}, t_0, \bar{\psi}, P, t_{\text{о.с.}}, t_{\text{п}}, t_{\text{к}}, P_{\text{атм}}, t_{\text{об}}, \tau_{\text{об}}, W_{\text{об}}, \Delta t_{\text{о.с.}}, \Delta P_{\text{атм}} \rangle,$$

где C – тип катализатора, определяющий его состав и зависящий от содержания активного компонента, носителя и промотора; ω_{air} – расход газовой среды, м³/с; t_0 – температура раствора исходных компонентов катализатора, °С; $\bar{\psi}$ – геометрические размеры емкости для пред- и посттермической обработки катализатора; P – тип обработки катализатора; $t_{\text{о.с.}}$ – температура окружающей среды, °С; $t_{\text{п}}$, $t_{\text{к}}$ – температуры среды в рабочей зоне и в слое катализатора, °С; $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па; $W_{\text{об}}$ – удельная мощность, Вт/м³; $\tau_{\text{об}}$ – продолжительность, с и $t_{\text{об}}$ – температура обработки раствора исходных компонентов катализатора, °С; $\Delta t_{\text{о.с.}}$ – нестабильность температуры окружающей среды, °С; $\Delta P_{\text{атм}}$ – нестабильность атмосферного давления, Па.

Информационный поток технологической системы производства УНТ y' , характеризующий полупродукт – металлоксидную форму катализатора, полученного методом термического разложения неустойчивых соединений, может быть представлен совокупностью наиболее важных параметров, характеризующих его свойства:

$$y' = \langle S_{\text{уд}}, \rho, \ell_{\text{ср}}, \chi \rangle,$$

где $S_{\text{уд}}$ – удельная поверхность, м²/г; ρ – насыпная плотность, кг/м³; $\ell_{\text{ср}}$ – средний диаметр частиц катализатора, мкм; χ – геометрические размеры кристаллитов, мкм.

Информационный поток процесса синтеза УНТ X_{CVD} целесообразно представить в следующем виде:

$$X_{\text{CVD}} = \langle P_{\text{C}_{\text{xH}_y}}, G_{\text{C}_{\text{xH}_y}}, T_{\text{CVD}}, \tau_{\text{CVD}} \rangle,$$

где $P_{\text{C}_{\text{xH}_y}}$ – тип углеродсодержащего сырья;

$G_{\text{C}_{\text{xH}_y}}$ – расход углеродсодержащего сырья, м³/ч; T_{CVD} – температура процесса синтеза УНТ, °С; τ_{CVD} – продолжительность процесса синтеза УНТ, ч.

Промежуточный информационный поток y' , являющийся выходным для процесса получения катализатора, в совокупности с информационным потоком X_{CVD} , характеризующим условия реализации процесса синтеза УНТ, является входным информационным потоком для процесса синтеза нанотрубок y'' и может быть записан в общем виде как:

$$y'' = \langle y', X_{\text{ГФХО}} \rangle$$

или

$$y'' = \langle S_{\text{уд}}, \rho, \ell_{\text{ср}}, \chi, P_{\text{C}_{\text{xH}_y}}, G_{\text{C}_{\text{xH}_y}}, T_{\text{ГФХО}}, \tau_{\text{ГФХО}} \rangle.$$

Оценку эффективности разработанного подхода к управлению рассматриваемой производственной системой целесообразно осуществлять по параметрам синтезируемых УНТ, требования к которым определяются заказчиком и областью их дальнейшего применения. В качестве типового примера, выходной информационный поток процесса синтеза УНТ (Y) может включать в себя набор следующих параметров, характеризующих наноструктуры:

$$Y = \langle D, d, \gamma, I_{D/G} \rangle,$$

где D и d – соответственно внешний и внутренний диаметры УНТ, нм; $I_{D/G}$ – степень их дефектности; γ – удельный выход нанопродукта, г_C/г_{кат}. Степень дефектности УНТ определяют с помощью рамановской спектроскопии по соотношению интенсивностей спектральных полос, обусловленных дефектами графенового слоя (I_D) и колебаниями атомов углерода в плоскости графенового слоя (I_G). Эффективность полученного катализатора оценивали по удельному выходу УНТ, который показывает какая масса нанопродукта формируется на грамме катализатора.

Исследование влияния возмущающих факторов $t_{o.c.}$, $P_{атм}$, $\Delta t_{o.c.}$, $\Delta P_{атм}$ на свойства катализатора и как следствие на параметры синтезируемых на нем УНТ позволило ими при дальнейшем изучении производственной системы пренебречь из-за малой значимости.

В соответствии с новым подходом к управлению системой производства УНТ с заданными параметрами необходимо установить состав катализатора и условия обработки его физическим воздействием, обеспечивающие формирование целевого нанопродукта. Однако в связи со сложностью процессов и их многофакторностью точное совпадение всех значений параметров, характеризующих синтезируемые УНТ, с ранее заданными невозможно. Поэтому для решения озвученной выше проблемы необходимо добиться минимального различия их значений, что предусматривает постановку и решение оптимизационной задачи.

Итак, основными управляющими факторами в соответствии с новым подходом к управлению параметрами УНТ являются тип (P), время ($\tau_{об}$), температура ($t_{об}$) и удельная мощность ($W_{об}$) обработки катализатора физическим воздействием. Учитывая сложность решения и относительно низкое качество решения многокритериальной задачи оптимизации, предлагается использовать однокритериальную оптимизационную задачу с комплексным критерием оптимальности.

На основе состава выходного информационного потока процесса синтеза нанопродукта Y с использованием метода аддитивной свертки частных критериев [6, 7] был сформулирован комплексный критерий оптимальности управления технологической системой производства УНТ.

Так как значения параметров информационного потока Y отличаются на порядки, то при формулировке критерия оптимальности необходимо использовать их относительные величины. При определении записи критерия оптимальности необходимо учесть значимость параметров, входящих в его состав. Степень относительной значимости отдельных параметров, характеризующих синтезируемые УНТ, определяется областями их дальнейшего применения на основе экспертной оценки.

В связи с тем, что количество варьируемых переменных невелико, некоторые из них принимают дискретные значения и время решения данной оптимизационной задачи с использованием ЭВМ не критично, при выборе метода решения оптимизационной задачи следует ориен-

тироваться на безградиентные методы, которые, как правило, работают более надежно.

Вследствие вышесказанного, критерий оптимальности управления системой производства УНТ предлагается представить в виде суммы модулей относительных отклонений параметров, характеризующих выходной информационный поток процесса синтеза наноструктур Y с соответствующими весовыми коэффициентами:

$$M = \sum_{i=1}^n \alpha_i \left| \frac{z_i - z_{i0}}{z_{i0}} \right|, \quad (1)$$

где z_i – полученное значение параметра, характеризующего синтезированные УНТ; z_{i0} – заданное значение параметра; n – количество параметров, характеризующих выходной информационный поток процесса получения нанопродукта Y ; α_i – весовой коэффициент.

Таким образом, в соответствии с разработанной методологией поддержки принятия решений при промышленном производстве УНТ, решение оптимизационной задачи необходимо для определения условий реализации процесса получения катализатора, обеспечивающего синтез наноструктур с параметрами, значения которых наиболее близки к заданным.

Так как процессы получения катализатора и синтеза УНТ являются очень сложными и до конца не изученными совмещенными процессами, то на данном этапе вывод строгих аналитических зависимостей результатов процессов от условий их осуществления на основе физических представлений невозможен. В связи с этим, предлагается при постановке и решении оптимизационной задачи использовать в качестве уравнений связей соответствующие аппроксимационные зависимости, полученные на основе обработки экспериментальных данных. Так как при получении данных зависимостей использованы удельные мощности физических воздействий, то их можно использовать при масштабировании технологических процессов.

Для получения формализованной постановки оптимизационной задачи необходимо установить функциональные зависимости параметров, характеризующих выходной информационный поток процесса синтеза УНТ (Y) от состава катализатора, типа и условий обработки его физическим воздействием. При этом состав катализатора и тип физического воздействия представляются дискретными величинами.

ми, а условия физического воздействия на катализатор, определяющие параметры УНТ являются непрерывными.

Исходя из этого, в рамках разработанной методологии аппроксимационные зависимости должны быть представлены в следующем виде:

$$Y(C, P, \tau_{об}, t_{об}, W_{об}) = \begin{cases} C = I \\ P = I \end{cases} \cdot \begin{cases} D_1 = f_{D1}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ d_1 = f_{d1}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ \gamma_1 = f_{\gamma1}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ I_{D1} = f_{D1} \frac{D_1}{G}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \end{cases} \\ \\ \begin{cases} C = I \\ P = 2 \end{cases} \cdot \begin{cases} D_2 = f_{D2}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ d_2 = f_{d2}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ \gamma_2 = f_{\gamma2}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ I_{D2} = f_{D2} \frac{D_2}{G}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ \dots \\ \dots \\ D_{N_C} = f_{D_{N_C}}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ d_{N_C} = f_{d_{N_C}}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ \dots \\ I_{D_{N_C}} = f_{D_{N_C}} \frac{D_{N_C}}{G}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}). \end{cases} \quad (2)$$

В результате выполнения необходимого комплекса экспериментальных исследований установлены функциональные зависимости, позволяющие получить информацию о влиянии условий обработки катализатора физическим воздействием на параметры синтезируемых УНТ [8].

Предложена следующая вербальная постановка задачи оптимизации условий управления системой производства УНТ: требуется найти такие значения управляющих факторов $C, P, \tau_{об}, t_{об}, W_{об}$, при которых критерий оптимальности (1) достигает своего минимального значения при выполнении связей (2) и ограниченный вида:

$$\begin{aligned} 1 \leq C \leq N_C; \\ 0 \leq P \leq N_P; \\ \tau_{об \min} \leq \tau_{об} \leq \tau_{об \max}; \\ t_{об \min} \leq t_{об} \leq t_{об \max}; \\ W_{об \min} \leq W_{об} \leq W_{об \max}. \end{aligned}$$

N_C, N_P – количество составов катализатора и типов физического воздействия.

В качестве метода решения данной задачи выбран классический метод сканирования, как наиболее надежный при поиске глобального минимума. Алгоритм данного метода реализован на алгоритмическом языке C++, получено свидетельство о регистрации программного продукта.

На заключительном этапе реализации данной методологии был разработан интерфейс (рис. 2), обеспечивающий взаимодействие ЛПР с СППР при управлении производством УНТ с заданными параметрами.

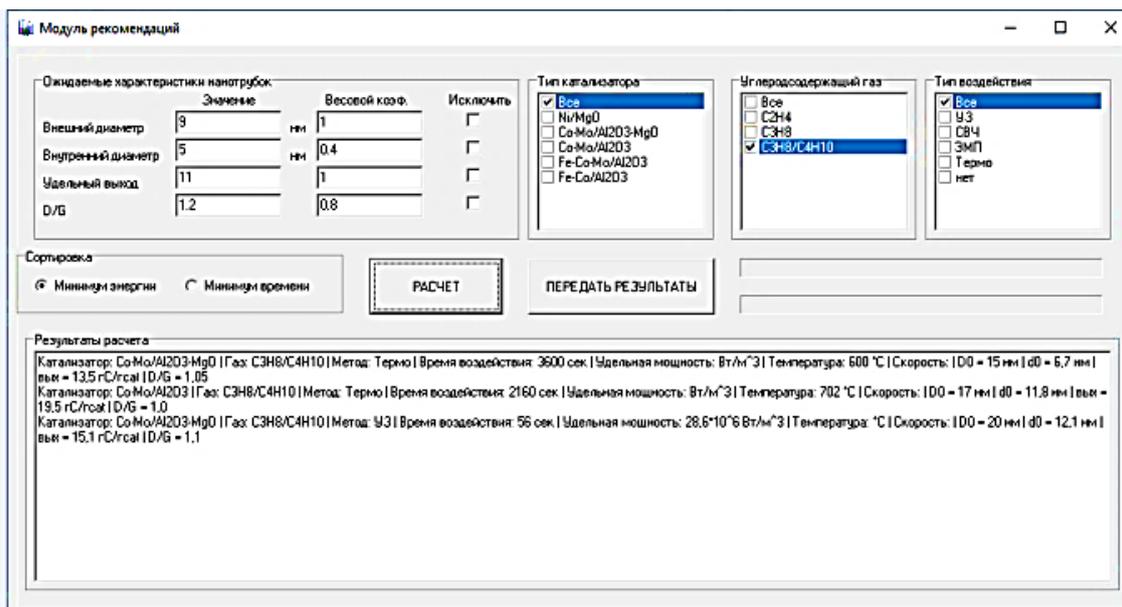


Рис. 2. Интерфейс СППР

В результате реализации всех этапов, предусмотренных методологией, описанной в данной работе, была разработана ИС, которая обеспечивает выработку рекомендаций технологических режимов получения катализатора, обеспечивающего синтез УНТ с заданными параметрами.

Схема взаимодействия СППР и ЛПР представлена на рис. 3.

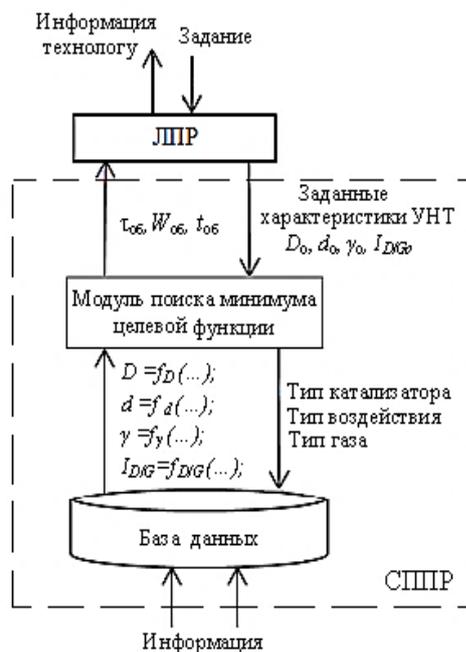


Рис. 3. Схема взаимодействия СППР и ЛПР

СППР, исходя из значений параметров УНТ, которыми должен обладать синтезированный наноматериал, находит все возможные сочетания управляющих факторов (C , P , $t_{об}$, $\tau_{об}$, $W_{об}$), обеспечивающие формирование нанотрубок с параметрами, значения которых наиболее близки к заданным.

Первые три найденных сочетания выводятся в нижней части рабочего окна СППР в порядке возрастания критерия оптимальности (рис. 2). На основе предложенных ИС рекомендаций ЛПР делает окончательный выбор условий формирования катализатора синтеза УНТ и передает их технологу.

Заключение

На основе нового подхода к управлению рассматриваемой производственной системой разработана методология поддержки принятия решений при производстве УНТ с заданными параметрами, реализация которой позволила создать ИС, обеспечивающую поддержку при-

нятия решений ЛПР при выборе состава и условий получения катализатора, обеспечивающего синтез наноструктур для конкретной области применения (с параметрами, значения которых наиболее близки к заданным).

Разработанная ИС была апробирована в ООО «НаноТЦ» (г. Тамбов). Использование катализатора, полученного в соответствии с рекомендациями СППР, при производстве УНТ позволило синтезировать наноструктуры с параметрами, значения которых оказались близкими к заданным, что подтвердило эффективность созданной системы.

Введение разработанной ИС и стадий обработки катализатора физическим воздействием в технологическую систему производства УНТ в качестве дополнительных компонентов позволило повысить эффективность управления производственным процессом. Применение разработанной СППР при управлении технологической системой производства УНТ способствует не только реализации их синтеза для конкретной области применения, в частности создания композитов в которых реализуется синергия взаимодействующих углеродных наноструктур, с меньшими затратами (меньшее количество необходимых экспериментов), но и существенному сокращению времени и производственных затрат при переходе технологической системы на выпуск УНТ с другими заданными параметрами.

Литература

1. Родионов В.В., Мякишев А.М. Обзор применений углеродных нанотрубок в полимерных композиционных материалах // Современные материалы, техника и технологии. 2019. № 6 (27). С. 8–12.
2. Конструкционные материалы радиотехнического назначения, модифицированные углеродными нанотрубками / И.Д. Краев, А.Е. Сорокин, Ю.В. Олихова, Ю.М. Титкова // Пластические массы. 2020. № 9 (10). С. 62–66.
3. Чесноков В.В., Буянов Р.А. Особенности механизма образования углеродных нанонитей с различной кристаллографической структурой из углеводородов на катализаторах содержащих металлы подгруппы железа // Серия. Критические технологии. Мембраны. 2005. № 4. С. 75–79.
4. Ding F., Rosen A., Bolton K. Molecular Dynamics Study of the Catalyst Particle Size Dependence on Carbon Nanotube Growth // Journal of Chemical Physics. 2004. Vol. 121(6). P. 2775–2779.
5. Experimental and simulation studies to determine the mechanisms of catalyst formation for the targeted synthesis of carbon nanotubes / Al. Imran, E. Burakova, A. Tkachev, E. Tugolukov, T. Dyachkova, A. Rukhov, A.S.A. Almalki, R.J. Obaid, M.A. Alsharif // Journal of Nanoparticle Research. 2021. Vol. 23 (9). 198. DOI: 10.1007/s11051-021-05320-3/.

6. Ногин В.Д. Линейная свертка в многокритериальной оптимизации // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. № 4. С. 73–82.

7. Новикова Н.М., Поспелова И. И., Зенюков А. И. Метод сверток в многокритериальных задачах с неопределенностью // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 5. С. 27–45.

8. Буракова Е.А. Концепция управления характеристиками нанотрубок путем обработки предшественника катализатора для их синтеза / Е.А. Буракова, Ю.В. Литовка, В.А. Нестеров, К.И. Сыпало, А.Г. Ткачев, Г.Ю. Юрков // Известия РАН. Теория и системы управления. 2022. № 5. С. 102–117.

Поступила 23.02.2023; принята к публикации 14.04.2023

Информация об авторах

Буракова Елена Анатольевна – канд. техн. наук, доцент, Тамбовский государственный технический университет (392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106), e-mail: elenburakova@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8927-7433>

DECISION SUPPORT WHEN MANAGING THE PRODUCTION OF CARBON NANOTUBES WITH SPECIFIED SETTINGS

E.A. Burakova

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Abstract: the article deals with the concept of managing the industrial production of carbon nanotubes (CNTs) with specified settings by the CVD method based on a new approach to managing the production system and taking into account the control factors provided by the introduction of additional stages of catalyst treatment by physical action. Based on this concept, a decision support methodology was developed and implemented in the industrial production of CNTs with specified settings, which made it possible to create an information system (IS) ensuring the technologist with all information about the composition and conditions of catalyst treatment by physical influence, contributing to the synthesis of nanostructures with parameters which values are the closest to the given ones. Using of IS in the production process contributes to a significant reduction in time and resources costs caused by the need to conduct additional experiments in order to establish conditions for obtaining a catalyst that ensures the implementation of CNTs synthesis with specified settings. It was established that the introduction of additional components into the technological system of CNTs production (decision support systems and technological stages of catalyst treatment by physical action) enables the system, without changing the conditions for the synthesis of nanostructures, quickly proceed to obtaining nanostructures with the required parameter values which are different from previously produced ones

Key words: decision support, methodology, management, information system, production of carbon nanotubes

Acknowledgements: the research was supported by the Russian Science Foundation (project 22-23-01072)

References

1. Rodionov V.V., Myakishev A.M. “Review of applications of carbon nanotubes in polymer composite materials”, *Modern Materials, Equipment and Technologies (Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii)*, 2019, no. 6 (27), pp. 8-12.
2. Kraev I.D., Sorokin A.E., Olikhova Yu.V., Titkova Yu.M. “Structural materials for radio engineering, modified with carbon nanotubes”, *Plastics (Plasticheskiye massy)*, 2020, no. 9 (10), pp. 62-66.
3. Chesnokov V.V., Buyanov R.A. “Features of the mechanism of formation of carbon nanowires with different crystallographic structure from hydrocarbons on catalysts containing metals of the iron subgroup”, *Series. Critical technologies. Membranes (Seriya. Kriticheskiye tekhnologii. Membrany)*, 2005, no. 4, pp. 75-79.
4. Ding F., Rosen A., Bolton K. “Molecular Dynamics Study of the Catalyst Particle Size Dependence on Carbon Nanotube Growth”, *Journal of Chemical Physics*, 2004, vol. 121(6), pp. 2775-2790. DOI:10.1063/1.1770424.
5. Imran Al., Burakova E., Tkachev A., Tugolukov E., Dyachkova T., Rukhov A., Almalki A.S.A., Obaid R.J., Alsharif M.A. “Experimental and simulation studies to determine the mechanisms of catalyst formation for the targeted synthesis of carbon nanotubes”, *Journal of Nanoparticle Research*, 2021, vol. 23 (9), p. 198. DOI: 10.1007/s11051-021-05320-3/.
6. Nogin V.D. “Linear convolution in multiobjective optimization”, *Artificial Intelligence and Decision Making (Iskusstvennyy intellekt i prinyatiye resheniy)*, 2014, no. 4, pp. 73-82.
7. Novikova N.M., Novikova N. M., Pospelova I. I., Zenyukov A.I. “The method of convolutions in multiobjective problems with uncertainty”, *RAN Proceedings. Theory and control systems (Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya)*, 2017, no. 5, pp. 27-45.
8. Burakova E.A., Litovka Yu.V., Nesterov V.A., Sypalo K.I., Tkachev A.G., Yurkov G.Yu. “The concept of controlling the characteristics of nanotubes by treating a catalyst precursor for their synthesis”, *RAN Proceedings. Theory and control systems (Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya)*, 2022, no. 5, pp. 102-117.

Submitted 23.02.2023; revised 14.04.2023

Information about the authors

Elena A. Burakova, Cand. Sc. (Technical), Assistant professor, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya Str., Tambov 392000, Russia), e-mail: elenburakova@yandex.ru, tel. (475) 263-55-22, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8927-7433>

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОТОМ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ПЧЕЛИНОЙ КОЛОНИИ

К.В. Егорова

Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова,
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: сегодня актуально использование группы беспилотных летательных аппаратов в областях, связанных с риском для жизни человека, благодаря их масштабируемости, гибкости и расширенному набору выполняемых функций, что перспективно при решении профессиональных задач, связанных с практической деятельностью в географических районах, обладающих особенностями исследования. Использование данных устройств наблюдается во многих отраслях жизнедеятельности человека при решении критически важных задач. Чаще всего главной задачей, которую надо решить при планировании и организации работы группы беспилотных летательных аппаратов, является задача организации взаимодействия между участниками группы. На сегодняшний день выделяется ряд алгоритмов, позволяющих обеспечить взаимодействие группы беспилотных летательных аппаратов. Данная статья посвящена задаче управления полетом группы беспилотных летательных аппаратов на основе алгоритма пчелиной колонии. Алгоритм пчелиной колонии может использоваться как основа метода автоматизированного управления группой беспилотных летательных аппаратов с целью организации эффективного внутригруппового взаимодействия. Автором предпринимается попытка построения научной базы для последующей реализации и использования данного алгоритма на практике. Для выполнения работы были применены теоретические методы исследования, а также использованы научные материалы отечественного и зарубежного авторства

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, имитационная модель, алгоритм, управление, пчелиная колония, полет, группа

Введение

Как уже было указано, на сегодняшний день наблюдается активное распространение использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Одной из ключевых задач, выполняемых посредством данных аппаратных решений является разведка и мониторинг местности. Однако наиболее важным вопросом эффективного использования БПЛА является разработка решений по их взаимодействию в пространстве. В современном мире уделяется значительное количество внимания в сторону разработки эффективных методов управления БПЛА и организации группы в полете [1].

На сегодняшний день выделяется ряд алгоритмов, позволяющих обеспечить взаимодействие группы БПЛА при решении практических задач. Несмотря на это, до сих пор не найдено наиболее эффективное и удовлетворяющее всем требованиям решение. Исходя из этого, не теряет актуальности задача, связанная с необходимостью поиска и разработки модели управления полетом группы беспилотных летательных аппаратов. Одним из инновационных инструментов, обеспечивающих решение данной задачи, может стать использование алгоритма пчелиной колонии [2].

Методы и материалы

Прежде, чем переходить к технической реализации данного алгоритма, следует рассмотреть его с биологической точки зрения. Пчелы в природе ищут нектар посредством выполнения разведывательных работ в окрестностях улья. Так, некоторое количество пчел-разведчиков, покидают улей и выполняют разведку окружающей среды. По результатам поиска данные пчелы возвращаются обратно в улей, где информируют других пчел с помощью танца и вибраций о местах с доступными источниками питания, направления, расстояния и количестве пропитания (рис. 1) [3].

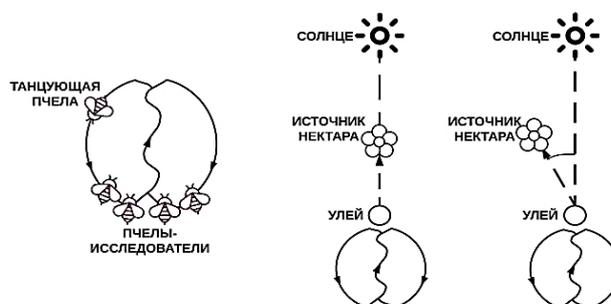


Рис. 1. Схема взаимодействия пчелиной колонии

Одна из пчел может последовать за разведчиком и стать фуражиром. Данная пчела

станет собирать нектар и информировать других пчел об остатке. Далее может быть совершено одно из следующих действий:

- оставить источник нектара и стать незанятым фуражиром;
- продолжать добывать нектар, не вербуя других пчел;
- продолжить добывать нектар, вербуя других пчел.

Данный процесс происходит непрерывно. Выполняется накопление нектара в улье и исследование новых областей, потенциально имеющих источник нектара. Таким образом, особи коллективно используют окружающую местность и ресурсы. Именно данная концепция может быть использована при организации полета группы беспилотных летательных аппаратов [4].

Рассмотрим данную задачу применительно к группе беспилотных летательных аппаратов, выполняющих мониторинг местности для обнаружения аномалий. Представленный алгоритм может быть использован с целью оптимизации и повышения рациональности использования ресурсов при проведении разведывательных работ. Так, вместо сканирования всеми БПЛА полной площади местности может быть использован принцип использования разведчиков с целью уточнения информации. Далее представлена уточненная концепция использования алгоритма пчелиной колонии применительно к группе беспилотных летательных аппаратов:

1. Разведывательная группа БПЛА выдвигается на частичную разведку местности, захватывающей всю ее площадь;
2. В результате сканирования посредством встроенного специального аппаратного обеспечения производится захват и анализ отдельных областей местности с высокого расстояния;
3. Полученные результаты подлежат обработке на базе БПЛА на основе использования соответствующего программного обеспечения;
4. Выявляются подозрительные места, имеющие вероятность наличия аномальных зон;
5. Посредством ретрансляторов или возвращения на базу информируются другие беспилотные летательные аппараты;
6. На установленные координаты выдвигается группа БПЛА, выполняющая подробное исследование местности.

На рис. 2 представлена графическая интерпретация реализации данного алгоритма применительно к группе беспилотных летательных аппаратов. Жирными линиями выделены траектории движения БПЛА-разведчиков. Тонкими линиями представлено движение вер-

бованных беспилотных летательных аппаратов для уточнения местности.

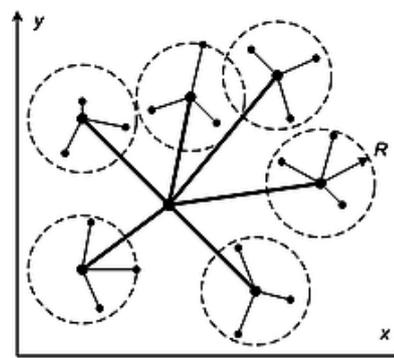


Рис. 2. Графическое представление взаимодействия БПЛА

Главным преимуществом использования данного алгоритма является экономия ресурсов и рациональное использование беспилотных летательных аппаратов. Может быть организована эффективная и высокоуровневая система управления БПЛА. Также особенностями использования данного алгоритма следует отметить адаптивность к изменяющимся условиям и возможность восстанавливать численность группы беспилотных летательных аппаратов при заканчивающихся ресурсах при работе [5].

Последующим направлением развития данного исследования является проведение имитационного моделирования. Сценарий данного эксперимента включает в себя узлы, которые должны имитировать поведение беспилотных летательных аппаратов, перемещающихся случайным образом в определенной области (рис. 3). В качестве источника трафика должен быть использован генератор с фиксированным темпом выдачи пакетов. Моделирование должно осуществляться с передачей трафика на транспортном уровне с помощью UDP-диаграмм и фиксированной скоростью [6].

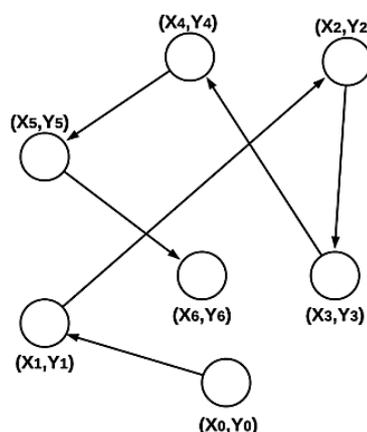


Рис. 3. Модель мобильности на основе случайных маршрутных точек

Результаты

В результате анализа соответствующих публикаций, выяснено, что основными параметрами имитационного моделирования данной задачи являются [7]:

- размер области моделирования;
- количество БПЛА;
- продолжительность итерации;
- скорость узлов;
- генератор трафика;
- модель распространения сигнала;
- тип антенны;
- зона покрытия антенны;
- транспортный уровень;
- размер пакета.

При этом основным элементом этой системы является скорость узлов. Необходимо отметить, что точное понимание уравнения, которое используется для определения скоро-

сти, и является ключом к пониманию всего процесса оптимизации. При этом скорость беспилотного летательного аппарата должна определяться в соответствии с заданным расположением позиций ПНП (персональная наилучшая позиция) и ГНП (глобальная наилучшая позиция). Она будет стремиться в направлении данных позиций в соответствии со следующим уравнением:

$$u_n^{i+1} = w * u_n^i + c_1 rand()(p_n - x_n) + c_2 rand()(g_n - x_n), \quad (1)$$

где u_n^i – скорость БПЛА в n -том измерении на предыдущем шаге, x_n – это координата частицы в n -том измерении, c – влияние других БПЛА, p_n – ПНП, g_n – ГНП.

На рис. 4 представлена итоговая иллюстрация разрабатываемого алгоритма.

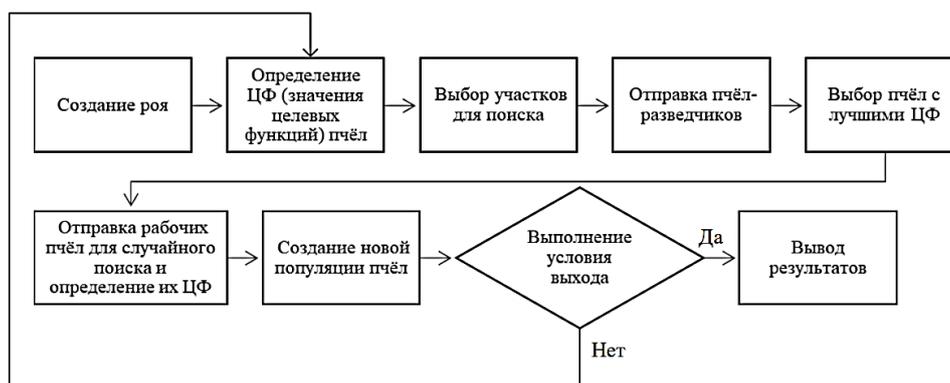


Рис. 4. Алгоритмическая интерпретация решения задачи управления группой БПЛА

В данном случае роем и пчелами являются группы БПЛА и сами беспилотные летательные аппараты соответственно.

Аппаратно-программная реализация данного алгоритма позволит наиболее оптимально использовать имеющиеся ресурсы для захвата и мониторинга большей площади. Фактически, задача сводится к минимизации использования ресурсов и максимизации исследуемой площади.

Наиболее прогрессивным и эффективным является реализация коллективного поведения БПЛА по принципу роя, когда каждый взаимодействует только с соседними устройствами с целью обмена информацией о себе и об окружающей их среде. Алгоритм пчелиной колонии может использоваться как основа метода автоматизированного управления группой БПЛА с целью организации эффективного внутригруппового взаимодействия [8]. Перспективой можно считать объединение и комбинирование других различных роевых алгоритмов с целью

повышения эффективности решения автоматизированного управления группой БПЛА.

Заключение

Основной целью представленной работы являлось рассмотрение вопроса организации группы беспилотных летательных аппаратов и постановки задачи использования алгоритма пчелиной колонии. В заключение необходимо отметить, что представленный алгоритм имеет высокую потенциальную эффективность своего применения при решении реальных задач. В последующих исследованиях предполагается построение имитационной модели, а также практическая реализация и тестирование рассмотренного алгоритма при решении реальных задач.

Литература

1. Гордиенко В. С., Полянин К. С. Система управления группой беспилотных летательных аппаратов // Наука

без границ. 2018. № 1 (18). С. 44-47.

2. Управление группой БПЛА при отработке кризисных полетных ситуаций в решении транспортных задач / А.И. Савельев, В.В. Лебедева, И.В. Лебедев, К.В. Камынин, Л.Д. Кузнецов, А.Л. Ронжин // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 1 (225). С. 110–120.

3. Леонов А.В., Литвинов Г.А. Применение алгоритма пчелиной колонии ВЕЕАДНОС для маршрутизации В FANET // Вестник СибГУТИ. 2018. № 1 (41). С. 85–95.

4. Толпегин О.А., Махонин И.О. Траектория навигации беспилотного летательного аппарата на посадочное устройство судна с заданными терминальными условиями // Вестник Череповецкого государственного университета, 2019. № 1 (88). С. 39-47.

5. Халимов Н.Р., Мефедов А.В. Распределенная сетцентрическая система управления группой ударных

беспилотных летательных аппаратов // Системы управления, связи и безопасности. 2019. №3. С. 1-13.

6. Аллакулиев Ю.Б. Анализ проблемных вопросов оценки эффективности системы сбора, передачи и отображения информации берегового центра управления автономными необитаемыми подводными аппаратами и обоснование концептуальных направлений их решения // Системы управления, связи и безопасности. 2019. №2. С. 143-161.

7. Скаков Е.С., Малыш В.Н. Пчелиный алгоритм оптимизации для решения задачи планирования беспроводной сети // Программные продукты и системы. 2016. №3. С. 67-73.

8. Sokolov, S., Egorova, K., Knysh, T. Exploring the use of unmanned aerial vehicles for automated oil spill identification// E3S Web of Conferences Volume 363, 14 December 2022. DOI: 10.1051/e3sconf/202236301032.

Поступила 13.02.2023; принята к публикации 18.04.2023

Информация об авторах

Егорова Кристина Вадимовна – аспирант, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова (198035, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7), e-mail: natashov1397@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4322-3223>

SIMULATION MODEL OF FLIGHT CONTROL OF A GROUP OF UNMANNED AERIAL VEHICLES BASED ON THE BEE COLONY ALGORITHM

K.V. Egorova

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

Abstract: today it is relevant to use a group of unmanned aerial vehicles in areas associated with a risk to human life, due to their scalability, flexibility and an expanded set of functions performed, which is promising when solving professional tasks related to practical activities in geographical areas with research features. The use of these devices is observed in many areas of human life when solving critical tasks. Most often, the main task to be solved when planning and organizing the work of a group of unmanned aerial vehicles is the task of organizing interaction between the group members. To date, several algorithms have been identified that make it possible to ensure the interaction of a group of unmanned aerial vehicles. This article is devoted to the task of controlling the field of a group of unmanned aerial vehicles based on the bee colony algorithm. The bee colony algorithm can be used as the basis of the method of automated control of a group of unmanned aerial vehicles to organize effective intra-group interaction. The author attempts to build a scientific base for the subsequent implementation and use of this algorithm in practice. To carry out the work, theoretical research methods were applied, as well as scientific materials of domestic and foreign authorship were used

Key words: unmanned aerial vehicle, simulation model, algorithm, control, bee colony, flight, group

Submitted 13.02.2023; revised 18.04.2023

References

1. Gordienko V.S., Polyinin K.S. "Control system of the group of the unmanned aerial vehicle", *Science without borders (Nauka bez granits)*, 2018, no. 1, pp. 44-47.
2. Savelyev A.I., Lebedeva V.V., Lebedev I.V., Kamynin K.V., Kuznetsov L.D., Ronzhin A.L. "UAV group management when working out of crisis flight situations in solving transport problems", *The Bulletin of SFedU. Engineering Sciences (Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki)*, 2022, no. 1, pp. 110–120.
3. Leonov A., Litvinov G. "Application of the BEEADHOC bee colony algorithm for routing to FANET", *The Bulletin of SibSUTIS (Vestnik SibGUTI)*, 2018, no. 1, pp. 85-95.
4. Tolpegin O.A., Mahonin I.O. "Trajectory of guidance of an unmanned aerial vehicle on a landing device of a vessel with specified terminal conditions", *The Bulletin of Cherepovets St.Un. (Vestnik Cherepovetskogo gos. un-ta)*, 2019, no. 1, pp. 39-47.
5. Halimov N.R., Mefedov A.V. "The distributed network-centric control system of an attacking unmanned aerial vehicles group", *Systems of control, communication and security (Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti)*, 2019, no. 3, pp. 1-13.
6. Allakuliev Yu.B. "Analysis problematic issues of control of the autonomous underwater vehicles from a coastal control center and the conceptual directions solution justification.", *Systems of control, communication and security (Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti)*, 2019, no. 2, pp. 143-161.
7. Skakov E.S., Malyshev V.N. "Bee colony optimization algorithm for wireless network planning problem solving", *Software products and systems (Programmnye produkty i sistemy)*, 2016, no. 3, pp. 67-73.
8. Sokolov S., Egorova K., Knysh T. "Exploring the use of unmanned aerial vehicles for automated oil spill identification", *E3S Web of Conferences*, vol. 363, 14 December 2022, DOI: 10.1051/e3sconf/202236301032.

Information about the authors

Kristina V. Egorova, Postgraduate, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (5/7 Dvinskaya st., Saint-Petersburg 198035, Russia), e-mail: natashov1397@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4322-3223>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО НАБОРА ПЕРЕМЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РЕЙТИНГОВЫХ СИСТЕМ

И.А. Седых, И.В. Стругов

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

Аннотация: рассматривается применение методов машинного обучения, в частности, задач классификации и кластеризации, для определения оптимального количества переменных, включаемых в состав модели, для выбора ключевых значимых показателей в рамках первых этапов работы, посвященной анализу современных рейтинговых систем и их особенностей, а также изучению подходов к их моделированию. В исследовании используется предварительно обработанная и подготовленная выборка данных, состоящая из рейтингов фильмов и описывающая некоторые качественные и количественные характеристики кинолент параметров, составленная на основе открытой базы TMDB (The Movie Database). Представлен случай использования задач кластеризации и классификации для проверки различных вариантов комбинирования переменных в наборы для оценки значений показателя рейтинга. Представлена реализация методов k-средних и иерархической кластеризации для задачи кластеризации, а также методы дерева решений и опорных векторов (SVM) в ходе классификации исследуемой выборки при помощи программных средств языка R. Для определения оптимального количества кластеров в процессе реализации метода k-средних задействуется метод локтя (elbow). Предлагается интерпретация как промежуточных результатов поэтапного хода работы, так и совокупности полученных выводов, определяется направление вектора дальнейшего продвижения исследования, а также приводится наглядное сравнение показателей точности в ходе итогового анализа полученных результатов для задействованных методов

Ключевые слова: методы машинного обучения, задача классификации, задача кластеризации, метод k-средних, иерархическая кластеризация, дерево решений, метод опорных векторов, оптимальное число переменных, рейтинговые системы

Введение

В наши дни рейтинговые [1] системы получили крайне широкое распространение: рейтинги товаров, медиа-продуктов, учебных заведений, сотрудников или учащихся. Многие компании и разработчики заинтересованы в создании рекомендательных систем [2] высокой точности, которые основаны в первую очередь на рейтингах объекта, который необходимо рекомендовать. Но большой проблемой при этом становится отсутствие единого принципа формирования систем ранжирования, а наиболее популярным способом определения ранга является накопление оценок и отзывов пользователей, которые основываются на их индивидуальных мнениях и формах оценки. Кроме того, нередко объектом обобщения показателя для формирования значения рейтинга становятся некорректные характеристики, особенно когда речь идет не о материальных предметах, составить численное описание которых несоизмеримо проще, а, к примеру, о рейтинге студентов или школьников. Такая ошибка может привести к непрактичности всей системы.

Данная работа посвящена исследованию и анализу принципов функционирования современных рейтинговых систем для дальнейшей разработки обобщенных подходов к моделированию и оценке структур, позволяющих определить ранг объекта, исходя из его объективных характеристик.

На данном этапе работы используется система рейтинга кино, как сфера, наиболее часто прибегающая к ранжированию на основе усреднения пользовательских оценок, то есть преобладанию множества субъективных представлений над определением объективных показателей.

Задача этапа заключается в определении оптимального числа и состава параметров [3] из выделенного набора при помощи методов машинного обучения, в частности задач классификации и кластеризации, с целью дальнейшего использования в моделировании.

Методы были реализованы при помощи программных средств языка R [4].

Данные

В качестве исходного набора был использован список из 3645 наименований фильмов и

двенадцати характеризующих их параметров, составленный на основе открытой базы TMDB (The Movie Database).

Примечаниями является, что при работе в параметре “совпадение названий”, отражающем соответствие прокатного названия картины оригинальному, различие наименований обозначалось нолём, а соответствие - единицей; значением параметра “длина описания” является количество слов, содержащихся в описании; параметры “жанр”, “оригинальный язык” и “страна производства” выражены порядковым численным значением, начиная от единицы, присваиваемым соответствующему уникальному исходному значению.

Использованные параметры и их условные обозначения, применявшиеся в ходе исследования, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Обозначения исследуемых факторов

Наименование параметра	Обозначение в расчётах
Бюджет	budget
Жанр	genre
Оригинальный язык	language
Совпадение названий	title_accordance
Длина описания	ovw_leght
Популярность	popularity
Страна производства	production_country
Год выхода	release_date
Сборы	revenue
Продолжительность	runtime
Количество проголо-совавших	vote_count
Рейтинговая оценка	vote_average

График плотности значений рейтинга представлен на рис. 1.

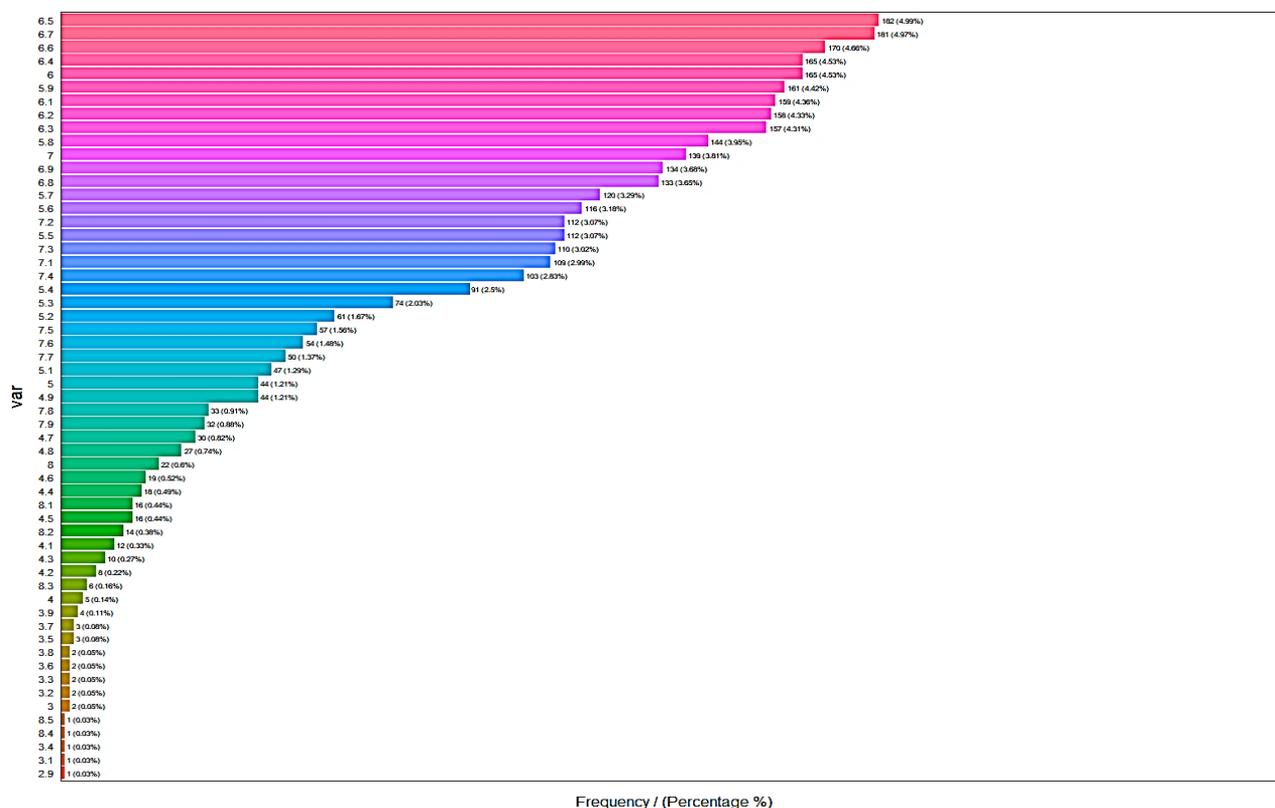


Рис. 1. Частоты значений рейтинга

Значение параметра бюджета варьировалось от 7 тыс. до 380 млн. долларов. Также допускалось значение бюджета 0 для картин с отсутствующим финансированием либо отсутствием данных в силу исторических или культурных обстоятельств. Также в выборку было допущено 11 формальных значений размером от 1 до 650 долларов. Жанровая принадлежность насчитывала 19 наименований, языковая

– 28, страна производства 54. Длина описания составляла от 10 до 175 слов. Продолжительность – от 25 до 338 минут. Самым ранним годом выхода картины был 1916, а наиболее поздним 2016. Кассовые сборы варьировались от 6399 до 2.788 млрд., при том, что нулевые значения также допускались для картин, не вышедших в прокат, при условии, что выборка содержала только вышедшие картины, случаи

отмены или заморозки съёмки отсекались.

В ходе исследования посредством применения методов регрессионного анализа [5] было получено несколько возможных вариантов модели, а также, при помощи алгоритма исчерпывающего поиска, выбрана последовательность включения параметров для различной размерности используемой модели, которая имеет следующий вид: (1) продолжительность, (2) количество голосов, (3) бюджет, (4) год выхода, (5) совпадение названий, (6) жанр, (7) язык, (8) популярность, (9) сборы, (10) длина описания, (11) страна производства. Для выбора ключевых параметров, а также определения их оптимального количества были использованы методы кластеризации и классификации. Реализация выполнялась на основе программных средств языка R.

Кластеризация

Исследование осуществлялось посредством проведения серии экспериментов, в рамках которых производилась кластеризация набора данных для разного количества и состава задействованных переменных [6]. Значение рейтинга экземпляров в состав наборов не включалось. В ходе работы использовался метод k-средних в качестве основного, а также иерархическая кластеризация [7] по методу Уорда в качестве альтернативного. Для определения оптимального числа кластеров применялся метод локтя (elbow), график представлен на рис. 2.

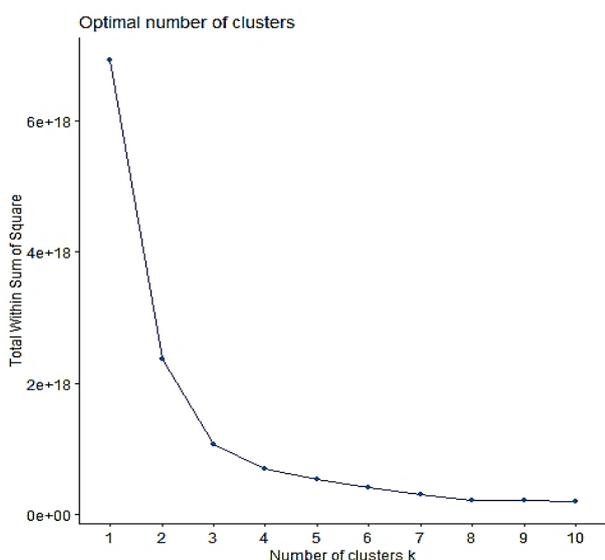


Рис. 2. Определение оптимального числа кластеров

В качестве оптимального было принято разбиение на три кластера. При этом исходный набор данных тоже был разделён на три группы в зависимости от значения показателя рейтинга. Так к первой группе были отнесены экземпляры с условно низким рейтингом, а именно ниже 6 (1182 строк), ко второй со средним, от 6 до 7.5 (2234 строк), и высоким, 7.5 и выше (229 строк). При этом самым низким значением рейтинга в выборке стало значение 2.9, а самым высоким 8.5.

Для сравнения оценивалось количество строк в полученных кластерах относительно принятого разбиения. Проверялись модели от трёх до одиннадцати включённых параметров. Наиболее близкие результаты были получены при использовании 4, 5 и 6 переменных, по составу соответствующих выбранному при определении оптимального порядка включения для соответствующих размерностей набору. Разница размеров получаемых при этом кластеров являлась незначительной. Приблизительный состав для метода k-средних: 977, 2422, 246 строк. В табл. 2 приведены средние показатели параметров внутри групп, полученных по методу k-средних при использовании четырёх переменных.

Таблица 2
Средние значения внутри кластеров

	Бюджет	Год выхода	Продолжительность	Кол-во проголосовавших
Кластер 1 (246)	161,449,187	2009	122	3302
Кластер 2 (977)	63,711,091	2004	114	1141
Кластер 3 (2422)	13,457,352	2001	107	564

Графики кластеризации представлены на рис. 3 для метода k-средних (слева) и метода Уорда (справа).

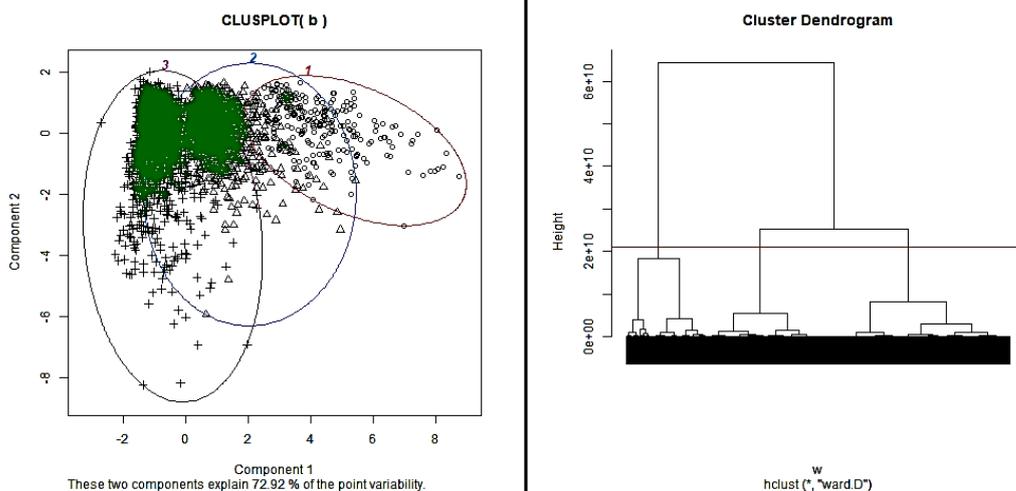


Рис. 3. Графики кластеризации

Классификация

Для использования в задаче классификации [8] исходная выборка была разбита на два набора: тестовый, состоящий из 911 строк исходного множества, и обучающий, в который входило 2734 строки. Состав наборов определялся при помощи генератора псевдослучайных чисел, реализованного при помощи функции `set.seed` и изменялся посредством корректировки параметра `seed`.

В ходе работы использовалась классификация по методу деревьев решений [9], а также, в качестве дополнительного, был задействован метод опорных векторов [10], SVM (Support vector machine).

Данный этап исследования также заключался в проведении ряда экспериментов,

заклучавшихся в оценке точности классификации, которая определялась как процентное соотношение матриц ошибок исходного множества и полученного в результате классификации прогноза для различных вариантов множества включаемых в модель переменных, а также разных составов обучающей и тестовой выборок. Приоритетной считалась проверка моделей набора, полученных на этапе кластеризации, а также предшествующих стадиях исследования. Особое внимание при этом уделялось определению ключевых параметров, используемых в процессе классификации изучаемого набора данных.

На рис. 4 представлен график дерева для классификации набора, содержащего четыре переменных: бюджет, год выхода, продолжительность, количество голосов.

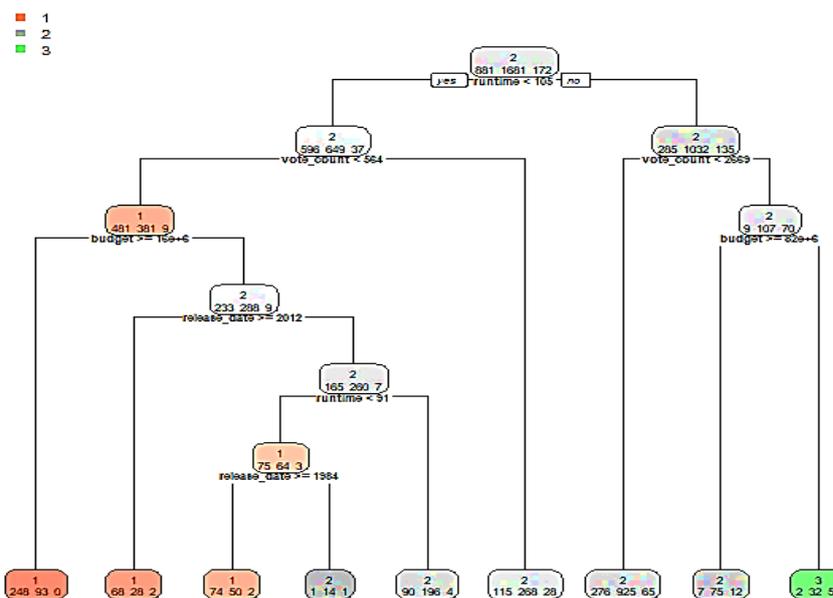


Рис. 4. Дерево. 4 параметра

На графике видно, что задействованы все четыре параметра, что соблюдалось для всех использованных вариаций значения начального распределения (seed), но наблюдаемые значения точности при этом ниже зафиксированных при использовании других составов переменных. Более подробный обзор значений точности классификации будет представлен далее.

На рис. 5 приведены графики распределения значений для исходного множества (слева), а также для тестовых наборов, полученных при классификации при помощи дерева решений (в центре) и метода SVM (справа).

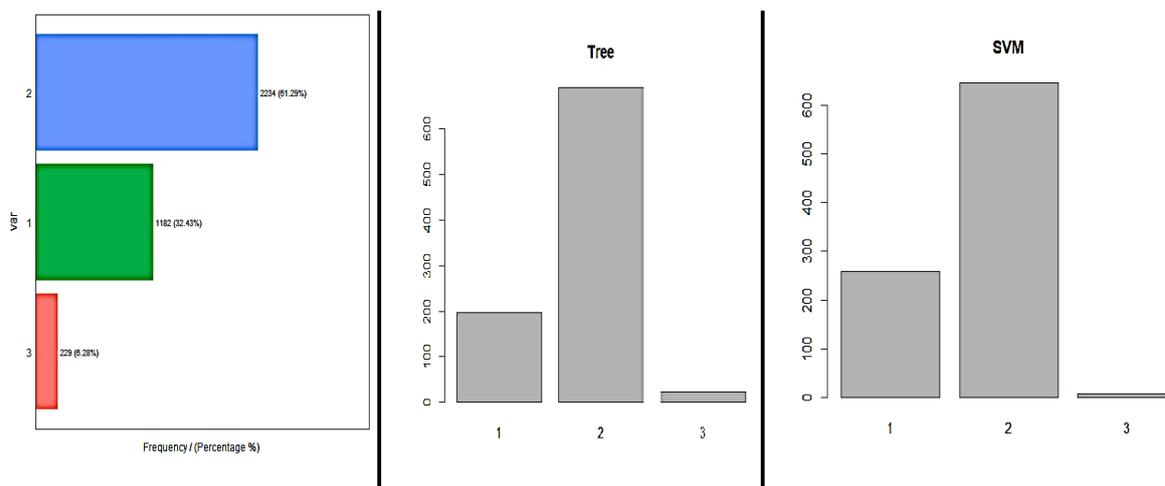


Рис. 5. Графики распределения

На рис. 6 изображены примеры полученных вариаций графиков деревьев решений при использовании шести переменных: бюджет, год

выхода, продолжительность, количество голов, жанр, совпадение названий.

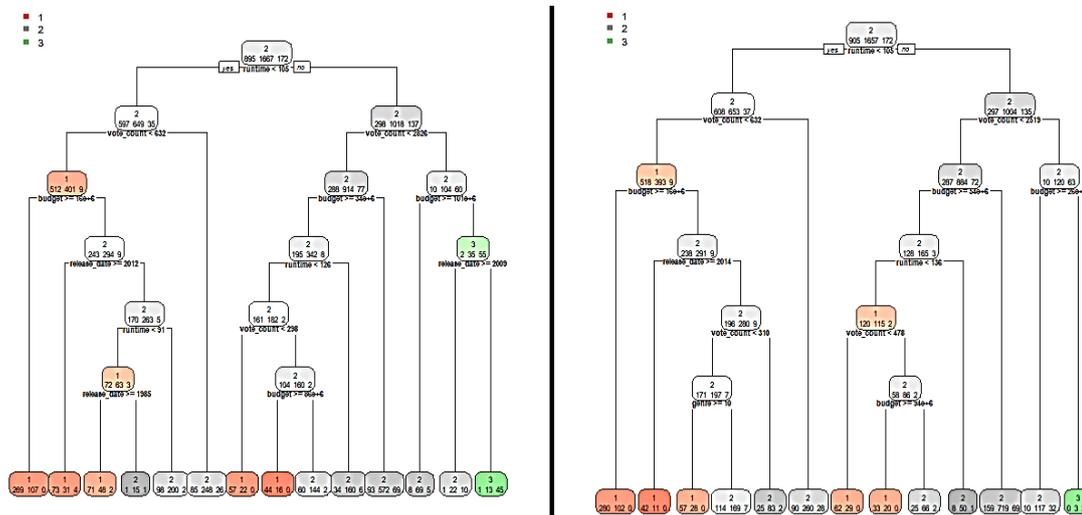


Рис. 6. Дерево. 6 параметров

Стоит отметить появление в составе полученных деревьев параметра жанра, что не противоречит полученным ранее результатам, а следовательно позволяет причислить его к ключевым переменным. При этом в ходе проведения экспериментов многократно отмечалось получение идентичных структур дерева, а

также совпадение значений точности прогноза для тестового множества с аналогичными условиями использования пяти параметров.

Сравнение выборки из наиболее часто получаемых значений точности анализируемых наборов представлено в табл. 3. Показатель точности представлен в процентах.

Уточняется, что сравнение представлено для основы из четырёх переменных (бюджет, год выхода, продолжительность, количество голосов), а также вариантов добавления показателей жанра и совпадения названий. Зафиксированные показатели точности для альтернативных составов модели размером от четырёх до шести параметров имели более низкие значения.

Таблица 3

Сравнение показателей точности

Метод	4 параметра	5 параметров (жанр)	5 параметров (совпадение названий)	6 параметров
Дерево решений	67.62	70.14	69.37	70.14
SVM	69.59	70.58	69.59	70.58

При использовании большего количества параметров были получены аналогичные либо менее точные результаты, вследствие чего было принято решение принять в качестве оптимального количества пять параметров, а в состав ключевых включить переменную жанра. Модели, использующие переменную совпадения названий вместо или вместе с переменной жанра в составе обозначенного набора аналогично имели сходных или уступающий в точности результат. Таким образом, в качестве оптимального набора ключевых параметров был выбран следующий: бюджет, год выхода, продолжительность, количество голосов, жанр. Также стоит отметить, что подобный набор не противоречит результатам предшествующих этапов исследования.

Заключение

В ходе работы была произведена оценка результатов применения задач кластеризации и классификации для анализа набора данных, используемого в ходе исследования и моделирования рейтинговых систем. Выбрано оптимальное количество включаемых в выборку в рамках поставленной задачи переменных. А также определен список ключевых параметров для дальнейшего применения.

Литература

1. Рейтинговая система / Ю. Л. Попов, В. Н. Подлеснов, В. И. Садовников, Е. Р. Андросюк, В. Г. Кучеров // Высшее образование в России, 2001. № 4. С. 131-137.
2. Recommender Systems: Handbook / F. Ricci, L. Rokach, B. Shapira, P. Kantor. New York: Springer, 2010. 842 p.
3. Шмойлова Р.А. Общая теория статистики: учеб. пособие. 3-е изд. М.: Финансы и Статистика, 2002. 560 с.
4. Lantz B. Machine Learning with R. Birmingham: Packt Publishing, 2013. 375 p.
5. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия. М.: Диалектика, 2007. 912 с.
6. Кузнецова Е.В., Стругов И. В. Анализ кластеризации показателей развитости критического мышления у студентов // Наука, образование, молодежь: горизонты развития: сб. тр. по материалам Национальной научно-практической конференции. Керчь: Изд-во ФГБОУ ВО «КГМТУ», 2021. С. 215-219.
7. Загоруйко Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: изд-во ин-та математики, 1999. 212 с.
8. Кузнецова Е.В., Стругов И. В. Анализ критического мышления студентов посредством применения статистических методов // Общество, образование, наука в современных парадигмах развития: сб. тр. по материалам Национальной научно-практической конференции. Керчь: Изд-во ФГБОУ ВО «КГМТУ», 2020. Ч. 2. С. 208-213.
9. Вьюгин В.В. Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования. М.: МЦМНО, 2013. 390 с.
10. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. New York: Springer, 2009. 745 с.

Поступила 21.03.2023; принята к публикации 13.04.2023

Информация об авторах

Седых Ирина Александровна – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры высшей математики, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30), e-mail: sedykh-irina@yandex.ru
Стругов Илья Владимирович – аспирант кафедры высшей математики, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30), e-mail: Strugov.Ilya@yandex.ru, тел.: +7(961)030-86-33

DETERMINATION OF THE OPTIMAL SET OF VARIABLES USING MACHINE LEARNING METHODS IN THE STUDY OF RATING SYSTEMS

I.A. Sedykh, I.V. Strugov

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract: the application of machine learning methods, in particular classification and clustering tasks, is considered to determine the optimal number of variables included in the model, as well as the selection of key significant indicators within the first stages of the work devoted to the analysis of modern rating systems and their features, as well as the study of approaches to their modeling. The study uses a pre-processed and prepared sample of data consisting of film ratings and describing some qualitative and quantitative characteristics of film parameters, compiled on the basis of the open TMDB database (The Movie Database). The case of using clustering and classification problems to test various options for combining variables into sets for evaluating the values of the rating indicator is presented. The implementation of k-means and hierarchical clustering methods for the clustering problem, as well as decision tree and support vector machine (SVM) methods in the course of classification of the sample under study using R programming tools is presented. To determine the optimal number of clusters in the process of implementing the k-means method, the elbow method is used. The interpretation of both the intermediate results of the step-by-step progress of the work and the totality of the conclusions obtained is proposed, the direction of the vector of further progress of the study is determined, and a visual comparison of accuracy indicators during the final analysis of the results obtained for the methods involved is provided

Key words: machine learning methods, classification problem, clustering problem, k-means method, hierarchical clustering, decision tree, support vector machine method, optimal number of variables, rating systems

References

1. Popov Yu.L., Podlesnov V.N., Sadovnikov V.I., Androsyuk E.R. "Rating system", *Higher education in Russia (Vyssheye obrazovaniye v Rossii)*, 2001, no. 4, pp. 131-137.
2. Ricci F., Rokach L., Shapira B., Kantor P. "Recommender systems: Handbook", New York: Springer, 2010, 842 p.
3. Shmoylova R.A. "General theory of statistics: textbook", 3rd ed., Moscow: Finansy i Statistika, 2002, 560 p.
4. Lantz B. "Machine learning with R", Birmingham: Packt Publishing, 2013, 375 p.
5. Draper N., Smith G. "Applied regression analysis. Multiple regression", Moscow: Dialectica, 2007, 912 p.
6. Kuznetsova E.V., Strugov I.V. "Analysis of clustering of indicators of critical thinking development among students", *Science, education, youth: horizons of development (Nauka, obrazovaniye, molodezh': gorizonty razvitiya): coll. of works*, Kerch: KGMTU, 2021, pp. 215-219.
7. Zagoruiko N.G. "Applied methods of data and knowledge analysis", Novosibirsk: Izd-vo in-ta matematiki, 1999, 212 p.
8. Kuznetsova E.V., Strugov I.V. "Analysis of students' critical thinking through the application of statistical methods", *Society, education, science in modern development paradigms (Obshchestvo, obrazovaniye, nauka v sovremennykh paradigmatkh razvitiya): coll of works*, part 2, Kerch: Izd-vo KGMTU, 2020, pp. 208-213.
9. Vyugin, V.V. "Mathematical foundations of the theory of machine learning and forecasting", Moscow: MCMNO, 2013, 390 p.
10. Hasti T., Tibshirani R., Friedman J. "Elements of statistical learning: data mining, logical inference and forecasting", New York: Springer, 2009, 745 p.

Submitted 21.03.2023; revised 13.04.2023

Information about the authors

Irina A. Sedykh, Dr. Sc. (Technical) Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Higher Mathematics, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya str., Lipetsk, 398055, Russia), e-mail: sedykh-irina@yandex.ru

Ilya V. Strugov, Post-graduate student, Department of Higher Mathematics, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya str., Lipetsk, 398055, Russia), tel. +7(961)030-86-33, e-mail: Strugov.Ilya@yandex.ru

СРАВНЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ГАУССА И LUP-РАЗЛОЖЕНИЯ В ЗАДАЧЕ НАХОЖДЕНИЯ РАВНОВЕСНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

П.А. Сеченов

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация: рассмотрены программные комплексы, позволяющие определить конечный состав сложной гетерогенной системы. В основу таких комплексов заложены базы данных индивидуальных веществ. При расчете равновесного состава был применен принцип максимума энтропии. Задача нахождения равновесного химического состава представляется как решение нелинейного уравнения с ограничениями. Для решения нелинейного уравнения применяются методы: 1) неопределенных множителей Лагранжа, который позволяет перейти от задачи с ограничениями к задаче безусловной оптимизации; 2) Ньютона – Рафсона, который позволяет перейти от нелинейной системы уравнений к линейной; 3) Гаусса для решения системы линейных уравнений, а также для аналогичной задачи применяется LUP-разложение. Приведены теоретические сведения о вычислительной сложности алгоритмов решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Алгоритмическая сложность метода Гаусса составляет $O(N^3)$, метод LUP-разложения решается быстрее, разложение матрицы на две матрицы составляет такую же сложность, а решение двух треугольных матриц выполняется за время $O(N^2)$. Приведены отличительные особенности алгоритма LUP-разложения по сравнению с методом Гаусса. Проведен вычислительный эксперимент, показывающий скорость вычисления для методов Гаусса и LUP-разложения в зависимости от количества неизвестных в системе алгебраических линейных уравнений. Тестирование на трех конфигурациях компьютеров показало, что LUP-разложение выполняется быстрее, чем метод Гаусса, от 1,1 до 4,5 раз

Ключевые слова: метод Гаусса, LUP-разложение, равновесный состав, термодинамика, быстродействие алгоритмов

Введение

Для определения конечного состава сложной гетерогенной системы используют системы термодинамического моделирования. Такие системы позволяют без проведения натурального эксперимента рассчитать конечный состав по входным веществам. Одним из таких программных продуктов является программный комплекс TERRA [1, 2]. Фундаментом этих работ явились отечественные базы данных термодинамических параметров индивидуальных веществ – базы данных ИВТАН ТЕРМО [3, 4]. В таких базах данных для каждого индивидуального вещества хранятся: энтальпия образования, коэффициенты для расчета приведенной энергии Гиббса, молярная масса, плотность, интервалы температур, для которых справедливы коэффициенты полинома для расчета приведенной энергии Гиббса и другие. В основе программ термодинамического моделирования находится база простых веществ. Основные расчетные формулы при этом зависят от коэффициентов термодинамических функций, находящихся в базе данных.

Основные расчетные формулы для приведенной энергии Гиббса, удельной теплоёмко-

сти, энтропии и изменении энтальпии выглядят следующим образом:

$$F(T) = -\frac{G(T) - H(0)}{T} = f_0 + f \cdot \ln X + \frac{f_{-2}}{X^2} + \frac{f_{-1}}{X} + f_1 \cdot X + f_2 \cdot X^2 + f_3 \cdot X^3, \quad (1)$$

где $F(T)$ – приведенная энергия Гиббса, Дж/(моль·К); $G(T)$ – энергия Гиббса, Дж/(моль); $H(0)$ – энтальпия, Дж/(моль); T – температура, К; f_i – коэффициенты полинома; $X = T / 10^4$.

$$C_p^0(T) = f + \frac{2f_{-2}}{X^2} + 2f_1 \cdot X + 6f_2 \cdot X^2 + 12f_3 \cdot X^3, \quad (2)$$

где $C_p^0(T)$ – удельная теплоёмкость, Дж/(моль·К).

$$S(T) = s_0 + s \cdot \ln X + \frac{s_{-2}}{X^2} + s_1 \cdot X + s_2 \cdot X^2 + s_3 \cdot X^3, \quad (3)$$

где $S(T)$ – энтропия, Дж/(моль·К); s_i – коэффициенты полинома энтропии.

$$\frac{H(T) - H(0)}{T} = h_0 + \frac{h_{-2}}{X^2} + \frac{h_{-1}}{X} + h_1 \cdot X + h_2 \cdot X^2 + h_3 \cdot X^3, \quad (4)$$

где $H(T)$ – энтальпия при заданной температуре, Дж/моль; $H(0)$ – энтальпия при температуре 0 К.

В иностранных базах данных [5] и программных комплексах HSC Chemistry [6], Thermo-Calc [7] и FACTSAGE [8] применяются следующие формулы для расчета, в которых используются коэффициенты $A-H$:

$$C_p^\circ = A + B \cdot t + C \cdot t^2 + D \cdot t^3 + E/t^2, \quad (5)$$

$$H^\circ - H_{298,15}^\circ = A \cdot t + B \cdot t^2/2 + C \cdot t^3/3 + D \cdot t^4/4 - E/t + F - H, \quad (6)$$

$$S^\circ = A \cdot \ln(t) + B \cdot t + C \cdot t^2/2 + D \cdot t^3/3 - E/(2 \cdot t^2) + G, \quad (7)$$

где C_p – удельная теплоемкость, Дж/(моль·К);
 H° – стандартная энтальпия, Дж/(моль);
 S° – стандартная энтропия, Дж/(моль·К);
 $t = T/10^3$ температура, К.

Помимо разных коэффициентов полиномов в отечественных базах данных и иностранных отсчет энтальпии в первых базах данных берется от 0 К, во вторых – от 298 К.

Отечественная база данных является полной и включает в себя более 2500 соединений. База данных национального исследовательского института Америки, находящаяся в открытом доступе, включает более 1500 простых веществ, для которых заданы коэффициенты полинома. В ней отсутствуют коэффициенты для таких простых веществ, как углерод и оксид марганца, что не позволяет проводить расчеты для металлургии. Поэтому за основу базы данных в программном комплексе T-Energy была взята отечественная база данных.

Постановка задачи

Необходимо найти равновесный состав для сложной многокомпонентной системы при заданной температуре. При расчете равновесного состава был применен принцип максимума энтропии [9]. Нахождение максимума энтропии проводилось с помощью следующих методов: 1) для перехода от задачи условной оптимизации к задаче безусловной оптимизации использовался метод множителей Лагранжа

[10–12]; 2) для решения системы нелинейных уравнений использовался хорошо зарекомендовавший себя метод Ньютона, для того, чтобы метод сходился использовалась его модификация в виде метода Ньютона – Рафсона [12–14], в котором учитывались границы допустимых значений; 3) для решения линейной системы использовался метод последовательного исключения неизвестных – метод Гаусса, сложность которого составляет $O(N^3)$ [15], а также более быстрая его модификация LUP-разложение.

При этом метод Лагранжа используется один раз, а итерационный метод последовательного приближения Ньютона – Рафсона, как и метод для решения СЛАУ выполняется до тех пор, пока метод Ньютона не сойдется.

Наиболее трудоёмкой задачей является задача решения СЛАУ. Для решения СЛАУ существуют, как прямые методы, так и итерационные. К наиболее простым прямым методам относятся метод Гаусса, LUP-разложение, а к итерационным методам относятся методы Гаусса – Зайделя и метод Якоби. При этом итерационные методы Якоби и Гаусса – Зайделя хотя и выполняются быстрее [16], но требуют, чтобы матрица была положительно определенной. В табл. 1 приведена полученная симметричная матрица. Цветом выделены области, которые рассчитываются по разным формулам. Вторые производные по ограничениям обращаются в ноль (правый нижний угол), из-за этого система не является положительно определенной, что подтверждается сообщением в математическом пакете Scilab [17].

Таблица 1
Симметричная, но не положительно определенная матрица

x0	x1	x2	L1	L2
96,95	0,00	0,00	0,40	0,00
0,00	14,57	-2,00	0,40	0,40
0,00	-2,00	9,85	0,40	0,80
0,40	0,40	0,40	0,00	0,00
0,00	0,40	0,80	0,00	0,00

Существует более сложный в реализации итерационный метод би-сопряженных градиентов, являющийся модификацией итерационного стабилизированного метода [18], который встроен в решатель MS Excel и позволяет решить СЛАУ показанную в табл. 1. Рассмотрим

методы Гаусса и LUP-разложения для решения СЛАУ.

Методы исследования

В разработанной ранее программе T-Energy есть следующие модули: 1) база данных [19]; 2) реакции; 3) отображение свойств индивидуальных веществ и реакции; 4) модуль расчета термодинамического равновесия [20]. Для модуля расчета термодинамического равновесия применяются методы: Лагранжа, Ньютона – Рафсона и метод решения СЛАУ. Рассмотрим алгоритмы и сравним скорости вычисления методами решения СЛАУ Гаусса и LUP-разложения.

В матричном виде *метод Гаусса* можно записать в виде:

$$Ax = b,$$

$$\text{где } A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}, x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} b_1 \\ \dots \\ b_m \end{pmatrix}.$$

На первом этапе осуществляется прямой ход, когда систему приводят к ступенчатой или треугольной форме.

$$\begin{cases} a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + \dots + a_{1n} \cdot x_n = b_1 \\ 0 + a'_{22} \cdot x_2 + \dots + a'_{2n} \cdot x_n = b'_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 + 0 + \dots + a^*_{mn} \cdot x_n = b^*_m \end{cases}$$

На втором этапе осуществляется обратный ход, в результате которого выражают базисные переменные через небазисные.

LUP-разложение. Первая процедура представляет разбиение квадратной матрицы на две матрицы. L – нижняя часть, U – верхняя часть, P – одномерный массив перестановок строк.

Алгоритм LUP разложения показан на рис. 1.

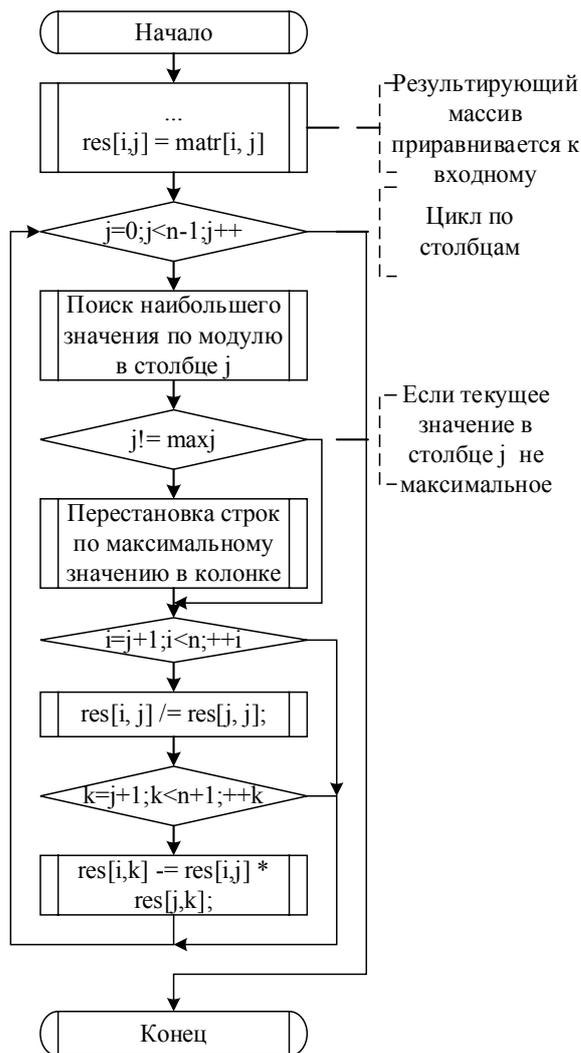


Рис. 1. Блок схема алгоритма LUP-разложения

Например, если есть матрица 3 на 3:

$$A = \begin{pmatrix} 4 & 5 & -4 \\ 1 & -2 & 3 \\ 8 & 1 & -7 \end{pmatrix}, \text{ то одно из её разложений}$$

$$\text{это } L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,5 & 1 & 0 \\ 0,5 & -0,472 & 1 \end{pmatrix} \text{ и } U = \begin{pmatrix} 8 & 1 & -7 \\ 0 & 4,5 & -0,5 \\ 0 & 0 & 3,638 \end{pmatrix}$$

$$\text{при этом } L \cdot U = \begin{pmatrix} 8 & 1 & -7 \\ 4 & 5 & -4 \\ 1 & -2 & 3 \end{pmatrix}, \text{ а } P = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \text{ т.е.}$$

чтобы вернуть матрицу $L \cdot U$ к исходной A необходимо поменять местами строки матрицы $L \cdot U$ нулевую на вторую, первую на нулевую и вторую на первую.

У нижней матрицы L по главной диагонали располагаются единицы, а сверху и справа от неё – нули. В верхней матрице U значения, располагающейся ниже и левее главной диагонали, равны нулю. Для экономии памяти, вместо запоминания двух матриц, будем запоминать одну

$$M_{LU} = \begin{pmatrix} 8 & 1 & -7 \\ 0,5 & 4,5 & -0,5 \\ 0,125 & -0,472 & 3,638 \end{pmatrix}.$$

Матрица перестановок необходима для того, чтобы при обращении матрицы на главной диагонали не было нулевых значений.

Операция LUP разложения занимает $O(N^3)$ времени.

Вторая процедура – это решение полученной матрицы M_{LU} , которая происходит в два этапа (рис. 2):

1) прямой ход для решения нижней треугольной матрицы $Ly = b$, в результате которой получается одномерная матрица y .

2) обратный ход для решения верхней треугольной матрицы $Ux = y$, в которую входит главная диагональ.

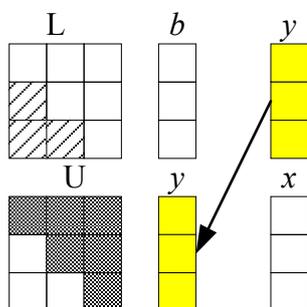


Рис. 2. Схема нахождения искомых значений через прямое и обратное прохождение

Третья процедура – возвращение найденных значений x с учетом перестановок в матрице P .

Результаты

Приведем результаты сравнения времени расчета нахождения равновесного состава с разным количеством неизвестных. При расчете методами Гаусса и LUP-разложением будем включать время для составления исходной матрицы. Для достоверности результата будем производить столько вычислений, чтобы общее время было более одной секунды и брать среднее время одного расчета.

Тестирование проводилось на трех вычислительных машинах со следующими характеристиками: А) операционная система (ОС) Windows 10, процессор AMD Phenom 955 BE (4 ядра по 3.2 ГГц, 2009 года выпуска), оперативная память 12 Гб.; Б) ОС – Windows 10, процессор Inter Pentium G5420 Gold (2 ядра, 4 потока 3.8 ГГц 2019 года выпуска), 128 Гб оперативной памяти; В) ОС – Windows 10, процессор Intel i7-F9700 (8 ядер, 8 потоков, максимальная частота 4.7 ГГц в турбо режиме, 2019 год выпуска), 128 Гб оперативной памяти. Все вычисления проводились с использованием одного ядра процессора.

В табл. 2–4 приведены результаты сравнения реализованных методов Гаусса и LUP-разложения на трех представленных выше конфигурациях компьютеров.

Таблица 2

Время вычисления на конфигурации А (Phenom 955 BE)

Количество неизвестных	Гаусс Время, мс	LUP- разложение Время, мс	$T_{\text{Гаусс}}/$ T_{LUP}
15	4,115	3,228	1,274
89	269,809	89,926	3,000
153	2788,273	613,454	4,545
214	6005,000	1419,167	4,231
376	29645,330	6699,167	4,425

Таблица 3

Время вычисления на конфигурации Б (Pentium G5420 Gold)

Количество неизвестных	Гаусс Время, мс	LUP- разложение Время, мс	$T_{\text{Гаусс}}/$ T_{LUP}
15	1,978	1,630	1,213
89	130,667	44,190	2,957
153	1118,727	303,364	3,688
214	2421,833	692,333	3,498
376	12209,333	3281,000	3,721

Таблица 4

Время вычисления на конфигурации В (i7-F9700)

Количество неизвестных	Гаусс Время, мс	LUP- разложение Время, мс	$T_{\text{Гаусс}}/$ T_{LUP}
15	1,629	1,391	1,172
89	106,048	38,000	2,791
153	927,000	250,727	3,697
214	1977,167	564,833	3,500
376	9914,167	2647,167	3,745

Как видно из табл. 2 – 4 разложение методом LUP быстрее метода Гаусса при количестве неизвестных более 150, ускорение составляет от 3,6 до 4,4 раз. В табл. 5 показано во сколько раз каждая из конфигураций выполняется быстрее, чем другая для методов Гаусса и разложения LUP.

Таблица 5
Отношение времени выполнения на различных конфигурациях

$T(\Gamma_A)/T(\Gamma_B)$	$T(\Gamma_A)/T(\Gamma_B)$	$T(\Gamma_B)/T(\Gamma_B)$	$T(LU_A)/T(LU_B)$	$T(LU_A)/T(LU_B)$	$T(LU_B)/T(LU_B)$
2,081	2,526	1,214	1,980	2,322	1,172
2,065	2,544	1,232	2,035	2,366	1,163
2,492	3,008	1,207	2,022	2,447	1,210
2,480	3,037	1,225	2,050	2,513	1,226
2,428	2,990	1,232	2,042	2,531	1,239

Конфигурации компьютеров Б и В оказались быстрее, конфигурации А от 2 до 3 раз при решении методом Гаусса, и от 1,92 до 2,5 при решении разложением LUP. При этом конфигурации В оказалась не значительно быстрее конфигурации Б, разрыв по времени расчета составил от 1,17 до 1,24 раз.

Выводы

Как видно из табл. 2–4 нахождение равновесного состава методом LUP-разложения выполняется всегда быстрее. При небольшом количестве неизвестных разница практически не заметна. А для решения СЛАУ размерности более 150 элементов ускорение от метода LUP-разложения по сравнению с методом Гаусса составляет от 3,6 до 4,5 раз. Практически это заметно для решения уравнения из 376 неизвестных, когда решение методом Гаусса выполняется за 29,6 секунд, а решение методом LUP-разложения за 6,7 секунд на самом слабом процессоре (конфигурация А), а на самой сильной конфигурации за 9,9 и 2,6 секунды для соответствующих методов.

Заключение

Реализован алгоритм нахождения равновесного состава сложной гетерогенной системы. Первая версия программы реализует методы Лагранжа, Ньютона – Рафсона и метод Гаусса, а вторая версия программа вместо метода Гаусса использует LUP-разложение. Вто-

рая версия программы показала лучший результат по скорости выполнения, который при размерности задачи более 150 неизвестных показывает ускорение в более чем 3,6 раза.

Литература

1. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013. 96 с.
2. Егорычев В.С. Расчет равновесного состав, термодинамических и теплофизических свойств продуктов сгорания ракетных топлив СПК TERRA: учебное пособие. Самара: Изд-во СГАУ, 2013. 56 с.
3. Gurvich L.V. et al. Termodinamicheskie svoystva individual'nykh veshchestv [Thermodynamic Properties of Individual Substances]. Reference book in 4 volumes by edition V.P. Glushko. Moscow: Nauka, 1978–1982.
4. Termodinamicheskie svoystva individual'nykh veshchestv [Thermodynamic Properties of Individual Substances]. Electronic reference book in 6 volumes. Project of NIU «MEI» and OIVT RAN. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/TTNB/2/OIVT/IVTANThermo/Rus/index.htm> (дата обращения 10.02.2023).
5. NIST Chemistry WebBook. URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/form-ser/> (дата обращения 10.02.2023).
6. HSC Chemistry. URL: <https://www.hsc-chemistry.com/> (дата обращения 10.02.2023).
7. Thermo-Calc Software URL: <https://thermocalc.com/> (дата обращения 10.02.2023).
8. FactSage Courses URL: <https://www.factsage.com/> (дата обращения 10.02.2023).
9. Рыбенко И.А., Сеченов П.А. Инструментальная система расчета термодинамических функций индивидуальных веществ, химических реакций и сложной многокомпонентной гетерогенной системы // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 3 (41). С. 18-27.
10. Богословский А.В., Разиньков С.Н. Синтез нулей диаграмм направленности антенных решеток для излучения узкополосных и импульсных сигналов с высокими коэффициентами направленного действия // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 2. С. 32-37.
11. Ткалич С.А., Бурковский В.Л. Оптимальное календарное планирование работ в системе безаварийного управления АЭС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 3. С. 16-20.
12. Рудков А.Л., Бурковский А.В., Яскевич О.Г. Оптимизационные модели управления динамикой перетоков мощности в электроэнергетических системах // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 6. С. 92-97.
13. Использование метода Ньютона - Рафсона при многокомпонентном математическом моделировании разработки месторождений жидких и газообразных углеводородов / И.В. Афанаскин, С.Г. Вольпин, А.В. Королев, П.В. Ялов // Вестник кибернетики. 2018. № 2 (30). С. 32-42.
14. Ким В.А. Методы Адамса-Башфорда-Моултона и Ньютона-Рафсона для численного анализа осциллятора Дуффинга с производной переменного дробного порядка Римана-Лиувилля // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2021. № 3 (33). С. 82-97.

15. Кожевников В.С., Матюшкин И.В. Вычисление детерминанта и произведения матриц в структуре клеточного автомата // Прикладная дискретная математика. 2019. № 46. С. 88-107.

16. Скоба А.Н., Михайлов В.К., Логанчук М.Л. Анализ эффективности методов решения систем линейных алгебраических уравнений при расчёте интегральных характеристик функционирования распределённых систем обработки информации // Инженерный вестник Дона. 2022. № 3 (87). С. 158-169.

17. Scilab URL: <https://www.scilab.org/> (дата обращения 11.02.2023).

18. Краснопольский Б.И., Никитин Н.В. О теплообмене в трехмерной прямоугольной камере, ориентиро-

ванной под углом к набегающему потоку // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2012. № 3. С. 29-38.

19. Сеченов П.А., Рыбенко И.А. База данных и программа для определения термодинамических свойств индивидуальных веществ // Информатика и системы управления. 2022. № 1 (71). С. 17-26.

20. Сеченов П.А., Рыбенко И.А. Численный метод и математическая модель нахождения равновесного состава термодинамической системы программного комплекса T-Energy. // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022. 49(4):104-112. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-104-112

Поступила 27.02.2023; принята к публикации 20.04.2023

Сведения об авторах

Сеченов Павел Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42), e-mail: pavesa89@mail.ru, тел. 8-950-582-07-05, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4551-382>

COMPARISON OF THE SPEED OF NUMERICAL METHODS OF GAUSSIAN AND LUP DECOMPOSITION IN THE PROBLEM OF FINDING THE EQUILIBRIUM CHEMICAL COMPOSITION

P.A. Sechenov

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract: software complexes that allow determining the final composition of a complex heterogeneous system are considered. Such complexes are based on databases of individual substances. When calculating the equilibrium composition, the principle of maximum entropy was applied. The problem of finding the equilibrium chemical composition is presented as the solution of a nonlinear equation with constraints. To solve a nonlinear equation, the methods are used: 1) indeterminate Lagrange multipliers, which allows us to move from a problem with constraints to an unconditional optimization problem; 2) Newton-Raphson, which allows us to move from a nonlinear system of equations to a linear one; 3) Gaussian LUP decomposition is used to solve a system of linear equations, as well as for a similar problem. Theoretical information about the computational complexity of algorithms for solving a system of linear algebraic equations (SLAE) is given. The algorithmic complexity of the Gauss method is $O(N^3)$, the LUP decomposition method is solved faster, the decomposition of a matrix into two matrices is the same complexity, and the solution of two triangular matrices is performed in $O(N^2)$ time. The distinctive features of the LUP decomposition algorithm in comparison with the Gauss method are given. A computational experiment has been carried out showing the calculation speed for Gauss and LUP decomposition methods depending on the number of unknowns in the system of algebraic linear equations. Testing on three computer configurations showed that LUP decomposition is performed 1.1 to 4.5 times faster than the Gauss method

Key words: Gauss method, LUP decomposition, equilibrium composition, thermodynamics, algorithm performance

References

1. Belov G.V., Trusov B.G. "Thermodynamic modeling of chemically reacting systems" ("Termodinamicheskoe modelirovanie himicheski reaktivnykh sistem"), Moscow: MGTU imeni N.E. Bauman, 2013, 96 p.
2. Egorychev V.S. "Calculation of the equilibrium composition, thermodynamic and thermophysical properties of the combustion products of rocket fuels of the SPK TERRA" ("Raschet ravnovesnogo sostava, termodinamicheskikh i teplofizicheskikh svoystv produktov sgoraniya raketnykh topliv SPK TERRA"), Samara: Izd-vo SGAU, 2013, 56 p.
3. Gurvich L.V. et al. "Thermodynamic Properties of Individual Substances", ref. book in 4 vol., ed. by V.P. Glushko, Moscow: Nauka, 1978–1982.
4. "Thermodynamic Properties of Individual Substances", elec. ref. book in 6 vol., Project of NIU «MEI» and OIVT RAN, available at: <http://twm.mpei.ac.ru/TTHB/2/OIVT/IVTANThermo/Rus/index.htm> (date of access 10.02.2023).
5. NIST Chemistry WebBook, available at: <https://webbook.nist.gov/chemistry/form-ser/> (date of access 10.02.2023).
6. HSC Chemistry, available at: <https://www.hsc-chemistry.com/> (date of access 10.02.2023).
7. Thermo-Calc Software, available at: <https://thermocalc.com/> (date of access 10.02.2023).
8. FactSage Courses, available at: <https://www.factsage.com/> (date of access 10.02.2023).

9. Rybenko I.A., Sechenov P.A. "Instrumental calculation system thermodynamic functions of individual substances, chemical reactions and complex multicomponent heterogeneous system", *The Bulletin of the Siberian State Industrial University (Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta)*, 2022, vol. 41, no. 3, pp. 18-27.
10. Bogoslovskij A.V., Razin'kov S.N. "The synthesis of antenna array pattern zeros for radiating narrowband and pulsed high directive gain signals", *The Bulletin of Voronezh state technical university (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 2, pp. 32-37.
11. Tkulich S.A., Burkovskij V.L. "Optimal calendar scheduling of work in system of accident-free management of nuclear power plants", *The Bulletin of Voronezh state technical university (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 12, no. 3, pp. 16-20.
12. Ruckov A.L., Burkovskij A.V., Yaskevich O.G. "Optimization models of power flow dynamics control in electric power systems", *The Bulletin of Voronezh state technical university (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 6, pp. 92-97.
13. Afanaskin I.V., Vol'pin S.G., Korolev A.V., Yalov P.V. "Use of Newton – Raphson Method in Multicomponent Mathematical Modeling of Liquid and Gas Hydrocarbons Deposits Development", *Proceedings in Cybernetics (Vestnik kibernetiki)*, 2018, vol. 30, no. 2, pp. 32-42.
14. Kim V.A. "Adams-Bashford-Moulton and Newton-Raphson methods for numerical analysis of the duffing oscillator with a Riemann-Liouville variable fractional derivative", *Problems of Computational and Applied Mathematics (Problemy vychislitel'noj i prikladnoj matematiki)*, 2021, vol. 33, no. 3, pp. 82-97.
15. Kozhevnikov V.S., Matyushkin I.V. "Computation of a determinant and a matrix product in cellular automata", *Computational Methods in Discrete Mathematics (Prikladnaya Diskretnaya Matematika)*, 2019, no. 46, pp. 88-107, available at: <https://doi.org/10.17223/20710410/46/8>
16. Skoba A.N., Mihajlov V.K., Loganchuk M.L. "Analysis of the effectiveness of methods for solving systems of linear algebraic equations in calculating the integral characteristics of the functioning of distributed information processing systems", *Engineering Journal of Don. (Inzh. vestn. Dona)*, 2022, vol. 87, no. 3, pp. 158-169.
17. Scilab, available at: <https://www.scilab.org/> (date of access 11.02.2023).
18. Krasnopol'skij B.I., Nikitin N.V. "On heat exchange in a three-dimensional rectangular cavity oriented at an angle to the incoming flow", *Fluid Dynamics (Izvestia RAN, Mekhanika Zhidkosti i Gaza)*, 2012, no. 3, pp. 29-38.
19. Sechenov P.A., Rybenko I.A. "Database and program for determining the thermodynamic properties of individual substances», *Computer science and control systems (Informatika i sistemy upravleniya)*, 2022, vol. 71, no. 1, pp. 17-26. DOI: 10.22250/18142400_2022_71_1_17
20. Sechenov P.A., Rybenko I.A. "Numerical method and mathematical model for finding the equilibrium composition of the thermodynamic system of the T-Energy software package", *The Bulletin of Daghestan State Technical University. Technical Science (Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki)*, 2022, vol. 49, no. 4, pp. 104-112. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-104-112

Submitted 27.02.2023; revised 20.04.2023

Information about the authors

Pavel A. Sechenov Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Applied Information Technologies and Programming, Siberian State Industrial University (42 Kirova str., Novokuznetsk 654007, Russia), e-mail: pavesa89@mail.ru, tel. 8-950-582-07-05; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4551-382>

АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ

Нгуен Хак Тунг

Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: рассматривается задача оценивания неизвестных параметров для класса нелинейных нестационарных систем. В этом случае предполагается, что матрица состояния системы содержит неизвестные нестационарные параметры. Допустим, что нестационарные параметры системы могут быть представлены как выходы линейных генераторов с неизвестными матрицей состояния и вектором начальных условий. Предлагается, что вектор состояния, сигнал управления и выходная переменная измеряемы. На первом шаге решается задача параметризации исходной динамической модели к линейной статической регрессионной модели. Вторым шагом выполняется оценка неизвестных постоянных параметров линейной регрессионной модели с применением метода динамического расширения регрессора и смешивания, позволяющего получать монотонные оценки и обеспечивающего ускорение сходимости оценок к истинным значениям. Результаты компьютерного моделирования показали работоспособность разработанного алгоритма. В работе был синтезирован адаптивный алгоритм оценивания переменных параметров и приведены результаты компьютерного моделирования. В отличие от аналогов, в настоящей работе рассмотрены более сложные допущения по неизвестным нестационарным параметрам, что нестационарные параметры системы могут быть представлены в виде линейных генераторов с неизвестными матрицей состояния и вектором начальных условий

Ключевые слова: нелинейные нестационарные системы, идентификация параметров, регрессионная модель

Введение

Представлен новый метод оценивания переменных параметров для класса нелинейных нестационарных систем. Данная проблема является актуальной для широкого круга научно-технических и практических задач.

Задача оценивания параметров нестационарных систем и синтез наблюдений переменных состояния хорошо изучена в работах [1-11]. В трудах [1-2] предложены методы управления нестационарными системами на основе метода прямого адаптивного управления. Предлагаемые методы не требуют процедуры идентификации параметров объекта управления. Развитие методов непрямого адаптивного управления позволяет для большого класса задач использовать именно идентификационные подходы адаптивного управления. Применение не прямых подходы для синтеза наблюдателей нестационарных систем рассматриваются в работах [3-9].

В [3] предложен алгоритм оценивания полиномиальных параметров для нестационарных систем. Метод для решения поставленной задачи основан на преобразовании математической модели управления линейного регрессионного выражения.

В [4] представлен алгоритм оценивания неизвестных переменных параметров линейных

нестационарных объектов управления. Неизвестные параметры рассматриваются в виде линейной функции времени, а их производные представляют собой кусочно-постоянные сигнал. Для параметризации линейного нестационарного объекта управления используется линейный фильтр. В результате можно наблюдать линейную регрессионную модель.

В работах [6-9] предложены методы синтеза наблюдений для нестационарных систем, основанных на методе GREVO (обобщенный наблюдатель, основанный на оценке параметров) [12].

В настоящей работе рассмотрены более сложные допущения по неизвестным нестационарным параметрам, таким образом нестационарные параметры системы могут быть представлены в виде линейных генераторов с неизвестными матрицей состояния и вектором начальных условий.

Постановка задачи

Рассмотрим нелинейные нестационарные системы

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \theta_1 f_1(x_1) + x_2 + b_1 u, \\ \dot{x}_2 &= \theta_2 f_2(x_2) + x_3 + b_2 u, \\ \dot{x}_n &= \theta_n f_n(x_n) + b_n u, \end{aligned} \quad (1)$$

$$y = x_1, \quad (2)$$

где $x_i \in \mathbb{R}^1$ – измеряемое состояние,

$\theta_i \in \mathbb{R}^1$ – неизвестный нестационарный параметр,

$b_i \in \mathbb{R}^1$ – неизвестный параметр,

$u \in \mathbb{R}^1$ – известный входной сигнал,

$y \in \mathbb{R}^1$ – измеряемая выходная переменная,

$f_i(x_i)$ – известная нелинейная функция, $i = \overline{1, n}$.

Требуется синтезировать алгоритм идентификации неизвестных параметров $\hat{\theta}_i(t), \hat{b}_i(t)$, чтобы

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\theta_i - \hat{\theta}_i(t)) = 0, \quad (3)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (b_i - \hat{b}_i(t)) = 0. \quad (4)$$

с учетом следующих допущений.

Допущение 1. Допуская что $f_i(x_i) \neq 0$.

Допущение 2. Нестационарные параметры θ_i могут быть представлены в виде линейных генераторов

$$\theta_i = h_i^T \xi_i, \quad (5)$$

$$\dot{\xi}_i = \Gamma_i \xi_i, \quad (6)$$

$$\Gamma_i = \Gamma_0 + \gamma_i^T h_i, \Gamma_0 = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ h_i^T = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0].$$

где $\xi_i \in \mathbb{R}^l$ – вектор состояния,

$\Gamma_i \in \mathbb{R}^{l \times l}$ – матрица неизвестных параметров,

$h_i \in \mathbb{R}^l$ – вектор соответствующей размерности,

$\gamma_i \in \mathbb{R}^l$ – вектор неизвестных параметров.

Метод параметризации модели объекта управления

В данном разделе представлен метод для параметризации нестационарных систем (1) – (2) к линейному регрессионному выражению.

Лемма. Рассмотрим объект управления (1) – (2) и модель генератора (5) – (6), существуют значения $\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{il}$, удовлетворяющие следующему соотношению

$$\frac{1}{p+\lambda} \xi_{i1} = \alpha_{i1} \xi_{i1} + \alpha_{i2} \xi_{i2} + \dots + \alpha_{il} \xi_{il}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} \theta_i = \xi_{i1}, \\ \dot{\xi}_{i1} = \xi_{i2}, \\ \vdots \\ \dot{\xi}_{il} = \gamma_{i1} \xi_{i1} + \gamma_{i2} \xi_{i2} + \dots + \gamma_{il} \xi_{il}. \end{cases} \quad (8)$$

где $\frac{1}{p+\lambda}$ – линейный фильтр,

$p = \frac{d}{dt}$ – дифференциальный оператор, параметр $\lambda > 0, \alpha_{im} \in \mathbb{R}, i = \overline{1, n}, m = \overline{1, l}$.

Доказательство леммы. Применим к левой и правой части (7) через оператор $(p + \lambda)$

$$(p + \lambda) \frac{1}{p+\lambda} \xi_{i1} = (p + \lambda)(\alpha_{i1} \xi_{i1} + \alpha_{i2} \xi_{i2} + \dots + \alpha_{il} \xi_{il}), i = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Преобразовав уравнение (9) следующим образом

$$\begin{aligned} \xi_{i1} &= (\alpha_{i1} \dot{\xi}_{i1} + \alpha_{i2} \dot{\xi}_{i2} + \dots + \alpha_{il} \dot{\xi}_{il}) \\ &\quad + \lambda(\alpha_{i1} \xi_{i1} + \alpha_{i2} \xi_{i2} + \dots + \alpha_{il} \xi_{il}). \\ \xi_{i1} &= \alpha_{i1} \xi_{i2} + \alpha_{i2} \xi_{i3} + \dots + \alpha_{i(l-1)} \xi_{il} + \\ &\quad + \alpha_{il}(\gamma_{i1} \xi_{i1} + \gamma_{i2} \xi_{i2} + \dots + \gamma_{il} \xi_{il}) + \\ &\quad + \lambda(\alpha_{i1} \xi_{i1} + \alpha_{i2} \xi_{i2} + \dots + \alpha_{il} \xi_{il}). \end{aligned} \quad (10)$$

С учетом уравнения (10) получим следующие соотношения

$$\begin{cases} \lambda \alpha_{i1} + \alpha_{il} \gamma_{il} = 1, \\ \lambda \alpha_{i2} + \alpha_{il} \gamma_{i2} + \alpha_{i1} = 0, \\ \vdots \\ \lambda \alpha_{ik} + \alpha_{il} \gamma_{il} + \alpha_{i(k-1)} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

где $k = \overline{2, l}$.

Перепишем (11) в матричном виде

$$\begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \gamma_{i1} \\ 1 & \lambda & 0 & \dots & 0 & 0 & \gamma_{i2} \\ 0 & 1 & \lambda & \dots & 0 & 0 & \gamma_{i3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & \lambda & \gamma_{i(l-1)} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & \lambda + \gamma_{il} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{i1} \\ \alpha_{i2} \\ \alpha_{i3} \\ \vdots \\ \alpha_{i(l-1)} \\ \alpha_{il} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Из модели (12) можем найти $\alpha_k, k = \overline{1, l}$ следующим образом

$$\begin{bmatrix} \alpha_{i1} \\ \vdots \\ \alpha_{il} \end{bmatrix} = \left(\lambda I - \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ I & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \gamma_{i1} \\ \vdots \\ \gamma_{il} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

что и требовалось доказать.

Следствие. Если параметры α_{ik} известны, то можем найти γ_{ik} как

$$\gamma_{i1} = \frac{1-\lambda\alpha_{i1}}{\alpha_{il}}, \gamma_{ik} = \frac{-\alpha_{i(k-1)}-\lambda\alpha_{ik}}{\alpha_{il}}, k = \overline{2, l}, i = \overline{1, n}. \quad (14)$$

С учетом допущения 1, разделив две части модели (1) на $f_i(x_i), i = \overline{1, n}$, получим

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \theta_1 + \frac{x_2}{f_i(x_1)} + b_1 \frac{u}{f_i(x_1)}, \\ \dot{x}_2 = \theta_2 + \frac{x_3}{f_i(x_2)} + b_2 \frac{u}{f_i(x_2)}, \\ \vdots \\ \dot{x}_n = \theta_n + b_n \frac{u}{f_i(x_n)}. \end{cases} \quad (15)$$

Из выражения (15) имеем

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{\dot{x}_1}{f_i(x_1)} - \frac{x_2}{f_i(x_1)} - b_1 \frac{u}{f_i(x_1)}, \\ \theta_2 = \frac{\dot{x}_2}{f_i(x_2)} - \frac{x_3}{f_i(x_2)} - b_2 \frac{u}{f_i(x_2)}, \\ \vdots \\ \theta_n = \frac{\dot{x}_n}{f_i(x_n)} - b_n \frac{u}{f_i(x_n)}. \end{cases} \quad (16)$$

Применим линейный фильтр $\frac{1}{p+\lambda}$ к выражению (16)

$$\begin{cases} \frac{1}{p+\lambda} \theta_1 = \frac{1}{p+\lambda} \xi_{11} = \frac{p}{p+\lambda} Z_{11} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{12} - K_1 b_1, \\ \frac{1}{p+\lambda} \theta_2 = \frac{1}{p+\lambda} \xi_{12} = \frac{p}{p+\lambda} Z_{21} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{22} - K_2 b_2, \\ \vdots \\ \frac{1}{p+\lambda} \theta_n = \frac{1}{p+\lambda} \xi_{1n} = \frac{p}{p+\lambda} Z_{n1} - K_n b_n. \end{cases} \quad (17)$$

где $Z_{i1} = \int \frac{dx_i}{f_i(x_i)}$, $K_i = \frac{u}{x_i}$, $Z_{j2} = \frac{x_j}{f(x_i)}$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{2, n-1}$.

Заметим, что

$$\begin{cases} \xi_{i2} = \xi_{i1}^{(1)}, \\ \xi_{i3} = \xi_{i2}^{(1)} = \xi_{i1}^{(2)}, \\ \vdots \\ \xi_{il} = \xi_{i(l-1)}^{(1)} = \xi_{i1}^{(l-1)} \end{cases} \quad i = \overline{1, n}.$$

тогда перепишем выражение (7) в следующем виде

$$\begin{cases} \frac{1}{p+\lambda} \xi_{11} = \alpha_{11} \xi_{11} + \alpha_{12} \xi_{11}^{(1)} + \\ + \alpha_{13} \xi_{11}^{(2)} + \dots + \alpha_{1l} \xi_{11}^{(l-1)} \\ \frac{1}{p+\lambda} \xi_{21} = \alpha_{21} \xi_{21} + \alpha_{22} \xi_{22}^{(1)} + \\ + \alpha_{23} \xi_{21}^{(2)} + \dots + \alpha_{2l} \xi_{21}^{(l-1)}, \\ \vdots \\ \frac{1}{p+\lambda} \xi_{n1} = \alpha_{n1} \xi_{n1} + \alpha_{n2} \xi_{n1}^{(1)} + \\ + \alpha_{n3} \xi_{n1}^{(2)} + \dots + \alpha_{nl} \xi_{n1}^{(l-1)}. \end{cases} \quad (18)$$

Применим линейный фильтр $\frac{1}{(p+\lambda)^l}$ к системе (18), и получим

$$\begin{cases} \frac{1}{(p+\lambda)^l} \left(\frac{1}{p+\lambda} \xi_{11} \right) = \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \alpha_{11} \left(\frac{1}{p+\lambda} \xi_{11} \right) + \dots + \\ + \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \alpha_{1l} p^{l-1} \left(\frac{1}{p+\lambda} \xi_{11} \right), \\ \frac{1}{(p+\lambda)^l} \left(\frac{1}{p+\lambda} \xi_{21} \right) = \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \alpha_{21} \left(\frac{1}{p+\lambda} \xi_{21} \right) + \dots + \\ + \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \alpha_{2l} p^{l-1} \left(\frac{1}{p+\lambda} \xi_{21} \right), \\ \vdots \\ \frac{1}{(p+\lambda)^l} \left(\frac{1}{p+\lambda} \xi_{n1} \right) = \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \alpha_{n1} \left(\frac{1}{p+\lambda} \xi_{n1} \right) + \dots + \\ + \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \alpha_{nl} p^{l-1} \left(\frac{1}{p+\lambda} \xi_{n1} \right). \end{cases} \quad (19)$$

На основе уравнения (17) перепишем уравнение (19) в следующем виде

$$\begin{cases} \frac{1}{(p+\lambda)^l} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{11} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{12} - \frac{1}{p+\lambda} K_1 b_1 \right) = \\ = \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \alpha_{11} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{11} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{12} - \frac{1}{p+\lambda} K_1 b_1 \right) + \dots + \\ + \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \alpha_{1l} p^{n-1} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{11} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{12} - K_1 b_1 \right), \\ \frac{1}{(p+\lambda)^l} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{21} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{22} - \frac{1}{p+\lambda} K_2 b_2 \right) = \\ = \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \alpha_{21} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{21} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{22} - \frac{1}{p+\lambda} K_2 b_2 \right) + \dots + \\ + \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \alpha_{2l} p^{n-1} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{21} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{22} - \frac{1}{p+\lambda} K_2 b_2 \right), \\ \vdots \\ \frac{1}{(p+\lambda)^l} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{n1} - \frac{1}{p+\lambda} K_n b_n \right) = \\ = \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \alpha_{n1} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{n1} - \frac{1}{p+\lambda} K_n b_n \right) + \dots + \\ + \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \alpha_{nl} p^{n-1} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{n1} - K_n b_n \right). \end{cases} \quad (20)$$

Из уравнения (20) имеем

$$\begin{cases} \frac{1}{(p+\lambda)^l} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{11} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{12} - \frac{1}{p+\lambda} K_1 b_1 \right) = \\ = \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \alpha_{11} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{11} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{12} - \frac{1}{p+\lambda} K_1 b_1 \right) + \dots + \\ + \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \alpha_{1l} p^{n-1} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{11} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{12} - K_1 b_1 \right), \\ \frac{1}{(p+\lambda)^l} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{21} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{22} - \frac{1}{p+\lambda} K_2 b_2 \right) = \\ = \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \alpha_{21} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{21} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{22} - \frac{1}{p+\lambda} K_2 b_2 \right) + \dots + \\ + \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \alpha_{2l} p^{n-1} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{21} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{22} - \frac{1}{p+\lambda} K_2 b_2 \right), \\ \vdots \\ \frac{1}{(p+\lambda)^l} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{n1} - \frac{1}{p+\lambda} K_n b_n \right) = \\ = \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \alpha_{n1} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{n1} - \frac{1}{p+\lambda} K_n b_n \right) + \dots + \\ + \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \alpha_{nl} p^{n-1} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{n1} - K_n b_n \right). \end{cases} \quad (21)$$

На основе уравнения (21) построим регрессионную модель для каждого канала

$$\mathcal{E}_i(t) = \chi_i^T(t) \theta_i, \quad (22)$$

где $\mathcal{E}_i = \frac{1}{(p+\lambda)^l} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{i1} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{i2} \right) \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ –

вычисляемая функция,

$$\begin{aligned} \chi_i^T = & [\beta_{i1} \dots \beta_{il} \beta_{i(l+1)} \beta_{i(l+2)} \dots \beta_{i(2l+1)}] \in \\ & \mathbb{R}^{(2l+1) \times n} - \text{регрессор}, \beta_{i1} = \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{i1} - \right. \\ & \left. \frac{1}{p+\lambda} Z_{i2} \right), \beta_{il} = \frac{p^{l-1}}{(p+\lambda)^{l-1}} \left(\frac{p}{p+\lambda} Z_{i1} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{i2} \right), \\ & \beta_{i(l+1)} = \frac{1}{(p+\lambda)^l} \frac{1}{p+\lambda} Z_{i3}, \\ & \beta_{i(l+2)} = -\frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}} \frac{1}{p+\lambda} Z_{i3}, \beta_{i(2l+1)} = \\ & -\frac{p^{l-1}}{(p+\lambda)^{l-1}} \frac{1}{p+\lambda} Z_{i3} - \text{элементы регрессора}, \\ & \theta_i = [\alpha_{i1} \dots \alpha_{il} b_i b_i \alpha_{i1} \dots b_i \alpha_{il}]^T \in \\ & \mathbb{R}^{(2l+1) \times n} - \text{вектор неизвестных параметров}, \\ & i = \overline{1, n}. \end{aligned}$$

Синтез наблюдателей нестационарных параметров

На основе оценки неизвестных параметров матрицы $\hat{\Gamma}_i$ и параметра \hat{b}_i , в этом разделе представляется метод оценивания параметров вектора $\xi_i(0)$ модели (5) – (6) методом GREBO [12].

Рассмотрим вспомогательную систему вида

$$\dot{\hat{\theta}}_i = h \frac{T}{i} \xi_{\theta i} \quad (23)$$

$$\dot{\xi}_{\theta i} = \Gamma_i \xi_{\theta i}. \quad (24)$$

Рассмотрим ошибку

$$\varepsilon_i = \xi_{\theta i} - \xi_i. \quad (25)$$

и ее производную с учетом уравнений (6) и (24)

$$\dot{\varepsilon}_i = \Gamma_i \varepsilon_i. \quad (26)$$

Решение дифференциального уравнения (26), имеем

$$\varepsilon_i = e^{\Gamma_i t} \varepsilon_i(0) = \Phi_i \varepsilon_i(0) = \Phi_i \eta_i. \quad (27)$$

где $\hat{\Phi}_i = \Gamma_i \Phi_i$ – фундаментальные матрицы, $\Phi_i(0) = I_{n \times n}$, $\eta_i^T = [\eta_{1i} \dots \eta_{mi}]$ – векторы неизвестных параметров.

Допустим, что начальные условия системы (23) – (24) нулевые, тогда

$$\varepsilon_i(0) = -\xi_i(0). \quad (28)$$

Откуда заметим, что задача оценивания векторов $\xi_i(0)$ может быть сведена к оцениванию векторов неизвестных параметров η_i , перепишем $\hat{\theta}$ в следующем виде

$$\hat{\theta}_i = h \frac{T}{i} \Phi_i \eta_i. \quad (29)$$

Подставим (29) в уравнение (17) и получим

$$\begin{cases} \frac{1}{p+\lambda} h_1 \Phi_1 \eta_1 = \frac{p}{p+\lambda} Z_{11} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{12} - K_1 b_1, \\ \frac{1}{p+\lambda} h_2 \Phi_2 \eta_2 = \frac{p}{p+\lambda} Z_{21} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{22} - K_2 b_2, \\ \vdots \\ \frac{1}{p+\lambda} h_n \Phi_n \eta_n = \frac{p}{p+\lambda} Z_{n1} - K_n b_n. \end{cases} \quad (30)$$

Из уравнения (30) получаем стандартное регрессионное уравнение

$$q_i(t) = M_i^T \eta_i. \quad (31)$$

где $q_i(t) = \frac{p}{p+\lambda} Z_{i1} - \frac{1}{p+\lambda} Z_{i2} \in \mathbb{R}^1$ – измеряемые функции, $M_i^T = \left[\frac{1}{p+\lambda} \Phi_{i11} \dots \frac{1}{p+\lambda} \Phi_{i1n} \right] \in \mathbb{R}^n$ – регрессоры, $\eta_i^T = [\eta_{i1} \dots \eta_{in}] \in \mathbb{R}^n$ – векторы неизвестных параметров.

Для оценивания параметров модели (21) и (31) используем метод Динамического Расширения регрессора и Смешивания (DREM) [13]. После использования известного метода (DREM) получается l независимых регрессионных моделей первого порядка.

Математическое моделирование

Моделирование проводилось при следующих параметрах системы

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \theta_1 f(x_1) + x_2 + b_1 u, \\ \dot{x}_2 &= \theta_2 f(x_2) + b_2 u, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \xi_1(0) = \begin{bmatrix} 3 \\ 2 \end{bmatrix}, b_1 = 3, f_1(x_1) = 3 + \\ & \sin(x_1), u = -(3 + \sin(t))x. \\ \Gamma_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -4 & 0 \end{bmatrix}, \xi_2(0) = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \end{bmatrix}, b_2 = 2, f_2(x_2) = 2 + \\ & \sin(x_2). \end{aligned}$$

На рис. 1 приведены переходные процессы оценки неизвестных параметров $\hat{\alpha}_{11}(t), \hat{\alpha}_{12}(t)$ при $\alpha_{11} = 0,5, \alpha_{12} = -0,5$. На рис. 2 показываються переходные процессы оценки неизвестных параметров $\hat{\gamma}_{11}(t), \hat{\gamma}_{12}(t)$ при $\gamma_{11} = -1, \gamma_{12} = 0$. На рис. 3, 4, 5 приведены результаты моделирования оценивания параметра $\hat{b}_1(t)$ вектора начальных условий $\hat{\xi}_1(0)$, и $\theta_1(t), \hat{\theta}_1(t)$ соответственно, а на рис. 6 приведен график ошибок $\theta_1(t) - \hat{\theta}_1(t)$.

На рис. 7 представлены переходные процессы оценки неизвестных параметров $\hat{\alpha}_{21}(t), \hat{\alpha}_{22}(t)$ при $\alpha_{11} = 0,2, \alpha_{12} = -0,2$, на рис. 3, 4, 5 приведены результаты моделирования оценивания параметра $\hat{b}_1(t)$ вектора начальных условий $\xi_2(0)$, и $\theta_2(t), \hat{\theta}_2(t)$, соответственно, на рис. 12 приведен график ошибок $\theta_2(t) - \hat{\theta}_2(t)$.

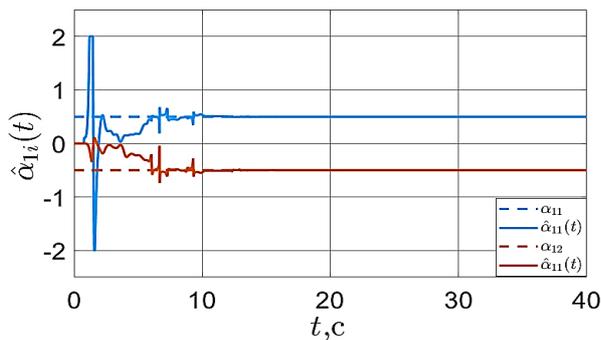


Рис. 1. График оценки параметров $\hat{\alpha}_{1i}(t)$

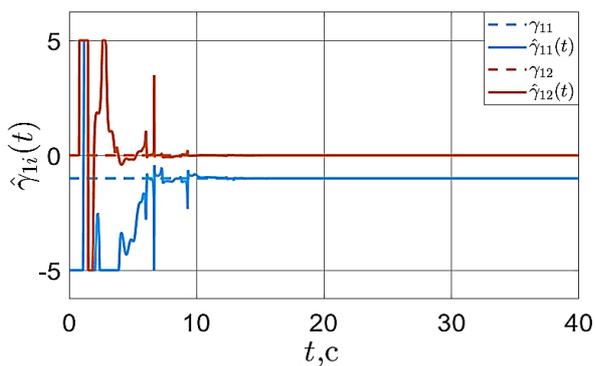


Рис. 2. График оценки параметров $\hat{\gamma}_{1i}(t)$

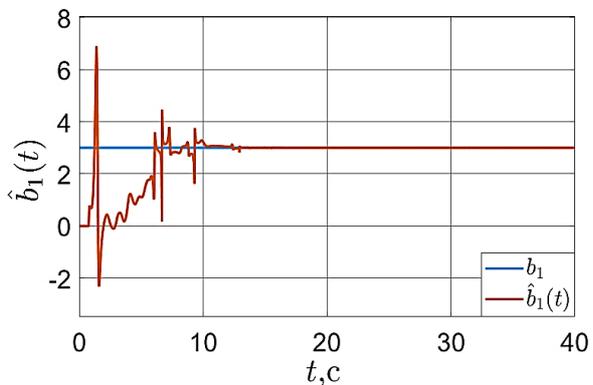


Рис. 3. График оценки параметров $\hat{b}_1(t)$

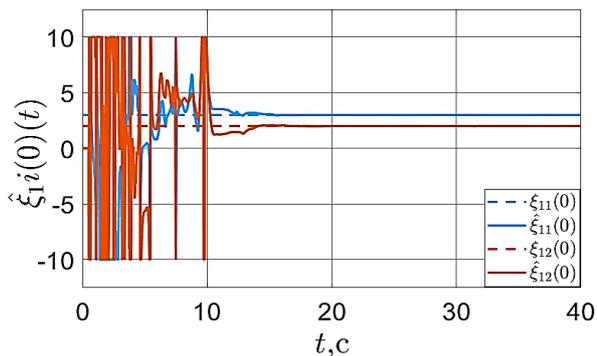


Рис. 4. График оценки параметров $\hat{\xi}_1(0)$

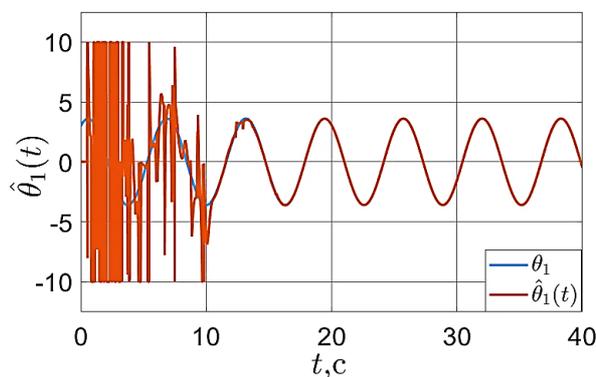


Рис. 5. График $\theta_1(t)$ и $\hat{\theta}_1(t)$

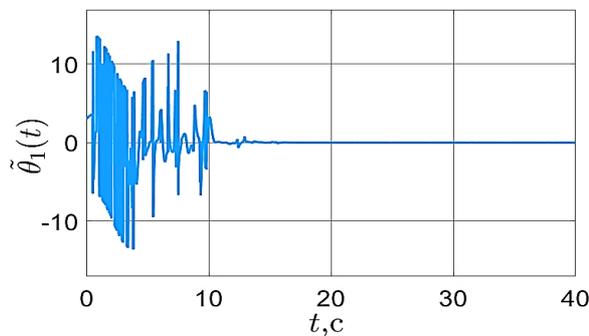


Рис. 6. График ошибки $\theta_1(t) - \hat{\theta}_1(t)$

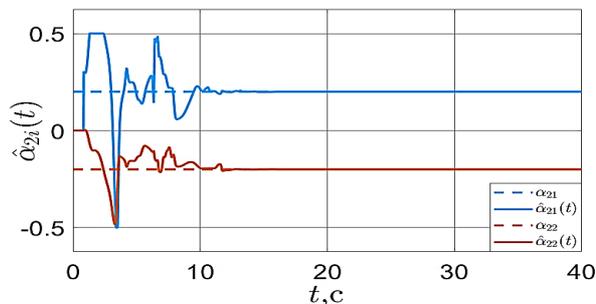


Рис. 7. График оценки параметров $\hat{\alpha}_{2i}(t)$

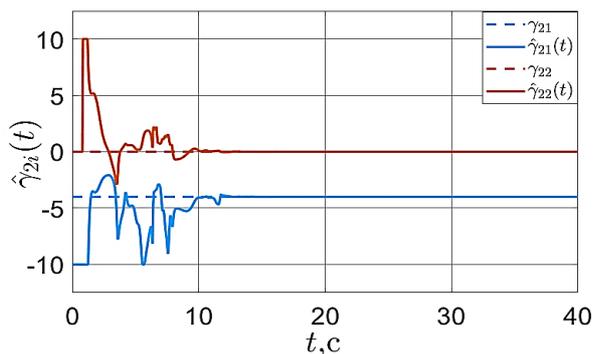


Рис. 8. График оценки параметров $\hat{\gamma}_{2i}(t)$

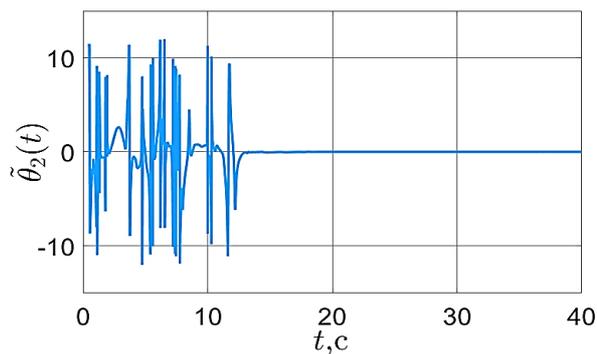


Рис. 12. График ошибки $\theta_2(t) - \hat{\theta}_2(t)$

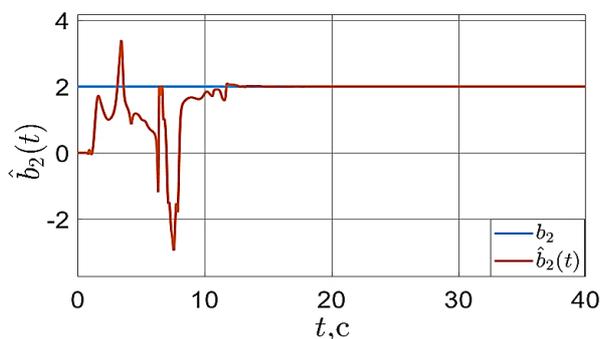


Рис. 9. График оценки параметра $\hat{b}_2(t)$

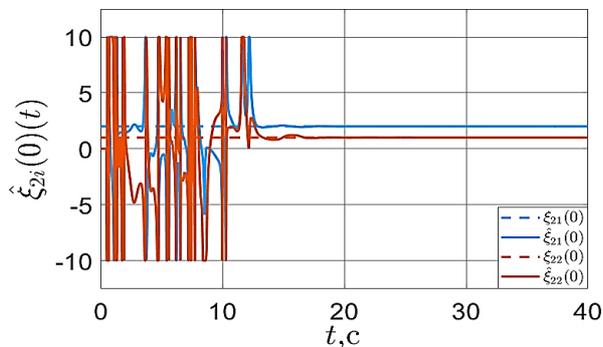


Рис. 10. График оценки параметров $\hat{\xi}_2(0)$

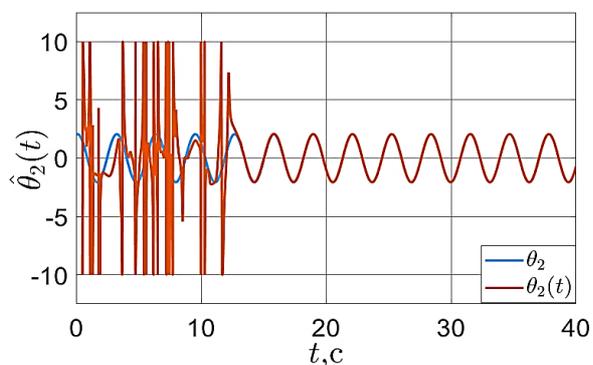


Рис. 11. График $\theta_2(t)$ и $\hat{\theta}_2(t)$

На рис. 1 – 12 приведены результаты моделирования предложенного в работе алгоритма оценивания параметров линейных нестационарных систем. Результаты моделирования показывают, что предложенный алгоритм гарантирует сходимость ошибки оценивания к нулю.

Заключение

В статье предложен новый метод оценивания неизвестных параметров для нестационарных нелинейных систем. Для решения данной задачи используется непрямого адаптивного управления или идентификационные методы. Выполнена оценка неизвестных параметров регрессионных моделей с использованием метода динамического расширения регрессора. Результаты моделирования подтверждают сходимость оценивания параметров к истинным значениям.

Литература

1. Бобцов А.А. Адаптивное управление по выходу линейными нестационарными объектами // Автоматика и телемеханика. 2006. № 12. С. 163–174.
2. Бобцов А.А. Алгоритм адаптивного управления нестационарным объектом в условиях возмущения и запаздывания // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 1. С. 8–14
3. Идентификация полиномиальных параметров нестационарных линейных систем / Д. Бинь, А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, А.А. Ведяков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение 2021. Т. 64. № 6. С. 459–468.
4. Идентификация линейно изменяющихся во времени параметров нестационарных систем / Т. Ван, М.М. Коротина, А.А. Бобцов, С.В. Аранновский, К.Д. Во // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20. № 5. С. 259–265.
5. Идентификация кусочно-линейных параметров регрессионных моделей нестационарных детерминированных систем / Ц. Ван, В. Т. Ле, А. А. Пыркин, С. А. Колубин, А.А. Бобцов // Автоматика и телемеханика. 2018. № 12. С. 71–82.
6. Синтез адаптивного наблюдателя для нестационарных нелинейных систем с неизвестными полиномиальными параметрами / Д. Бинь, А.А. Пыркин, А.А. Бобцов,

А.А. Ведяков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2021. Т. 21. № 3(133). С. 374–379.

7. Адаптивный наблюдатель переменных состояния линейной нестационарной системы с частично неизвестными параметрами матрицы состояния и вектора входа / А.А. Бобцов, Н. А. Николаев, Р. Ортега, О.В. Слита, О.А. Козачек // Мехатроника, автоматизация, управление [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie]. 2022. Т. 23. № 6. С. 283–288

8. Бобцов А.А., Лямин А.В., Сергеев К.А. Синтез закона адаптивного управления для стабилизации не точно заданных нестационарных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2001. № 3. С. 3–7.

9. Куок Д., Бобцов А.А. Адаптивный наблюдатель переменных состояния линейных нестационарных систем

с параметрами, заданными не точно // Автоматика и телемеханика. 2020. № 12. С. 100–110.

10. Клейман Е.Г., Мочалов И.А. Идентификация нестационарных объектов // Автоматика и телемеханика. 1994. № 2. С. 3–22.

11. Цыкунов А.М. Робастное управление нестационарными объектами // Автоматика и телемеханика. 1996. № 2. С. 117–125

12. Generalized parameter estimation-based observers: Application to power systems and chemical–biological reactors / R. Ortega, A. Bobtsov, N. Nikolaev, J. Schiffer, D. Dochain // Automatica. 2021. Vol. 129. Pp. 109–635.

13. Adaptive state observers using dynamic regressor extension and mixing / A. Pyrkin, A. Bobsov, R. Ortega, A. Vedyakov, S. Aranovskiy // Systems & Control Letters. 2019. – Vol. 133. P. 104519.

Поступила 02.03.2023; принята к публикации 20.04.2023

Информация об авторах

Тунг Нгуен Хак – аспирант факультета систем управления и робототехники, Национальный исследовательский университет ИТМО (197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49), e-mail: nguyengkhatungvhq1994@gmail.com, тел. +7(904) 338-66-19

ALGORITHM FOR ADAPTIVE ESTIMATION OF PARAMETERS FOR NONLINEAR NONSTATIONARY SYSTEMS

N.K. Tung

ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract: the paper considers the problem of estimating unknown parameters for a class of non-linear non-stationary systems. In this case, it is assumed that the system state matrix contains unknown non-stationary parameters. Let us assume that non-stationary parameters of the system can be represented as outputs of linear generators with unknown state matrix and initial conditions vector. It is proposed that the state vector, control signal and output variable are measurable. At the first step, the problem of parameterizing the initial dynamic model to a linear static regression model is solved. The second step is to estimate the unknown constant parameters of the linear regression model using the Dynamic Regressor Extension and Mixing method, which allows obtaining monotonic estimates and ensures the acceleration of the convergence of the estimates to the true values. The results of computer simulation showed the efficiency of the developed algorithm. In the paper an adaptive algorithm for estimating variable parameters was synthesized and the results of computer simulation were presented. Unlike analogues, in this paper we consider more complex assumptions for unknown non-stationary parameters, that the non-stationary parameters of the system can be represented as linear generators with unknown state matrix and initial conditions vector

Key words: non-stationary nonlinear systems, identification of parameters, regression model

References

1. Bobtsov A.A. “Adaptive output control of linear non-stationary objects”, *Automation and telemechanics (Avtomatika i telemekhanika)*, 2006, no. 12, pp. 163-174.
2. Bobtsov A.A. “Algorithm for adaptive control of a non-stationary object under conditions of disturbance and delay”, *Mechatronics, automation, control (Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie)*, 2007, no. 1, pp. 8–14.
3. Bin D., Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Vedyakov A.A. “Identification of polynomial parameters of non-stationary linear systems”, *Proceedings of higher educational institutions. Instrumentation (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye)*, 2021, vol. 64, no. 6, pp. 459-468.
4. Vav T., Korotina M.M., Bobtsov A.A., Aranovskiy S.V., Vo K.D. “Identification of parameters of non-stationary systems linearly changing in time”, *Mechatronics, automation, control (Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie)*, 2019, vol. 20, no. 5, pp. 259–265.
5. Van T., Lev V.T., Pyrkin A.A., Kolyubin S.A., Bobtsov A.A. “Identification of piecewise linear parameters of regression models of non-stationary deterministic systems”, *Automation and telemechanics (Avtomatika i telemekhanika)*, 2018, no. 12, pp. 71–82.
6. Bin D., Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Vedyakov A.A. “Synthesis of an adaptive observer for non-stationary nonlinear systems with unknown polynomial parameters”, *Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics (Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki)*, 2021, vol. 21, no. 3 (133), pp. 374–379.

7. Bobtsov A.A., Nikolaev N.A., Ortega R., Slita O.V., Kozachek O.A., “Adaptive observer of state variables of a linear nonstationary system with partially unknown parameters of the state matrix and input vector”, *Mekhatroniks, automation, control (Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie)*, 2022, vol. 23, no. 6, pp. 283-288.
8. Bobtsov A.A., Lyamin A.V., Sergeev K.A. “Synthesis of an adaptive control law for stabilization of inaccurately specified nonstationary objects”, *Proceedings of higher educational institutions. Instrumentation (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye)*, 2001, no. 3, pp. 3–7.
9. Kuok D., Bobtsov A.A. “Adaptive observer of state variables of linear nonstationary systems with inaccurately specified parameters”, *Automation and telemekhanics (Avtomatika i telemekhanika)*, 2020, no. 12, pp. 100–110.
10. Kleiman E.G., Mochalov I.A. “Identification of non-stationary objects”, *Automation and telemekhanics (Avtomatika i telemekhanika)*, 1994, no. 2., pp. 3-22.
11. Tsykunov A.M., “Robust control of non-stationary objects”, *Automation and telemekhanics (Avtomatika i telemekhanika)*, 1996, no. 2, pp. 117-125.
12. Ortega R., Bobtsov A., Nikolaev N., Schiffer J., Dochain D. “Generalized parameter estimation-based observers: application to power systems and chemical–biological reactors” *Automatica (Avtonatica)*, 2021, vol. 129, pp. 109–635.
13. Pyrkin A., Bobtsov A., Ortega R., Vediakov A., Aranovskiy S. “Adaptive state observers using dynamic regressor extension and mixing” *Systems & Control Letters*, 2019, vol. 133, p. 104519.

Submitted 02.03.2023; revised 20.04.2023

Information about the authors

Nguyen K. Tung, Post-graduate student, Faculty of Control Systems and Robotics, National Research University ITMO (49 Kronverkskiy prospect, St. Petersburg 197101, Russia), e-mail: nguyengkactunghvhq1994@gmail.com, tel. +7 (904) 338-66-19

МЕТОД КОНТРАСТИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ СРЕДСТВАМИ МОДИФИЦИРОВАННОГО S-ОБРАЗНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЯРКОСТИ

Д.В. Начаров

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

Аннотация: предложен метод контрастирования цифровых изображений средствами модифицированного S-образного преобразования яркости, в рамках которого предлагается подход к определению количественных значений показателей и точки перегиба функций преобразования яркости. Характеризуются классы изображений, к которым применим предлагаемый метод, также коротко описываются существующие методы контрастирования изображений, такие как линейное контрастирование, степенное преобразование яркости, гистограммная подгонка и гистограммная эквализация. Приводятся примеры малоконтрастных изображений, примеры их обработки известными методами, анализ достоинств и недостатков известных методов, формулируется суть предлагаемого метода, заключающаяся в аналитическом определении показателей степени S-образной функции преобразования яркости на основе определения с использованием интегральной функции распределения яркости границ поддиапазонов яркости, подлежащих сжатию с заданным коэффициентом. Для визуального анализа эффективности предлагаемого метода контрастирования и его сравнения с известными методами приводятся примеры обработки реальных изображений различного содержания. Представлены результаты анализа достоинств и недостатков данного метода, предлагается подход к автоматизированной оценке количественных параметров преобразования яркости, приводятся аналитические выражения для расчета показателей степени S-образной функции преобразования яркости

Ключевые слова: яркость, контраст, изображение, гистограмма, поддиапазон, нелинейное преобразование

Введение

Применение цифровых телевизионных сигналов, представленных в виде неподвижных изображений или в виде видеопоследовательностей, сегодня повсеместно. Изменчивость параметров фиксируемых на изображениях сцен чрезвычайно высока: съемка может проводиться внутри и вне помещений, при наличии как естественного, так и искусственного освещения, в условиях ясной атмосферы и условиях недостаточной видимости. При этом в следствие неидеальностей оптикоэлектронного оборудования, а также в связи с наличием дестабилизирующих факторов, качество фиксируемых изображений может ухудшаться — могут быть заметны шумы, резкость и контрастность могут быть недостаточными для различения объектов и их деталей и т.п.

Наиболее важной характеристикой, влияющей на информативность изображений и удобство различения объектов на них, является контрастность. Снижение контраста изображений может происходить в результате неоптимального выбора параметров регистрирующей системы, при съемке с применением оптического увеличения большой кратности, а также при недостаточной видимости при съемке вне помещений в условиях тумана, дымки и т.п.

Для коррекции контраста изображений могут применяться поэлементные преобразования яркости, такие как линейное контрастирование, степенное преобразование яркости, гистограммная эквализация, S-образного преобразования яркости. Достоинством методов линейного контрастирования и гистограммной эквализации является простота определения параметров функции преобразования яркости на основе параметров исходного изображения. Недостатком линейного контрастирования является относительно низкая эффективность увеличения контраста в случае наличия ненулевых столбцов на краях диапазона яркости гистограммы обрабатываемого изображения. Недостатком гистограммной эквализации является искажение исходных соотношений уровней яркости исходного изображения в результате изменения функции распределения яркости, что чаще всего приводит к тому, что обработанное изображение воспринимается как «нереалистичное». Кроме того, в результате гистограммной эквализации часто проявляются ложные контуры в обширных областях равномерной яркости, таких как область, соответствующая небу.

Степенные и S-образное преобразования яркости за счет использования нелинейных функций преобразования яркости характеризуются большей эффективностью увеличения

контраста по сравнению с линейным контрастированием, а по сравнению с гистограммной эквализацией характеризуются меньшими внесимыми искажениями исходных соотношений яркости. Однако их применение зачастую ограничивается интерактивными приложениями в связи с отсутствием однозначных алгоритмов автоматического выбора параметров нелинейных функций преобразования.

Предлагается метод контрастирования изображений средствами модифицированного S-образного преобразования яркости, в рамках которого предлагается подход к определению количественных параметров функций преобразования яркости. Предлагаемый метод приме-

ним для слабоконтрастных изображений, имеющих «узкую» гистограмму, близкую по форме к унимодальной.

В статье приведены результаты экспериментальной проверки предложенного метода в сравнении с существующими методами с использованием базы тестовых изображений.

Постановка задачи

На рис. 1-3 показаны примеры изображений со сниженной контрастностью и их гистограммы яркости.

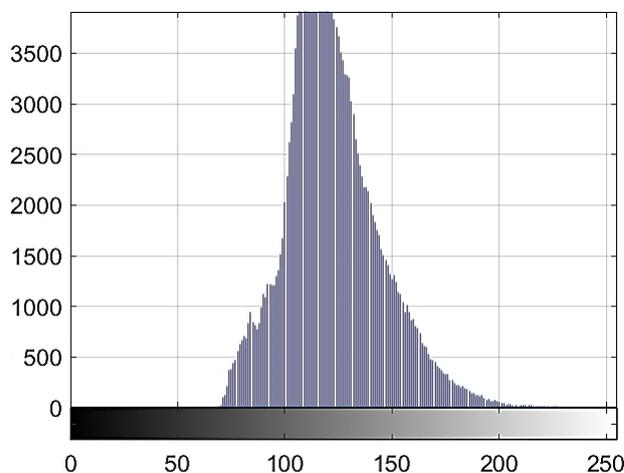
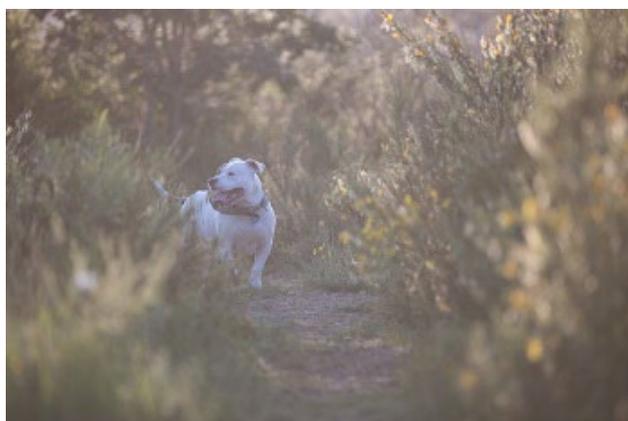


Рис. 1

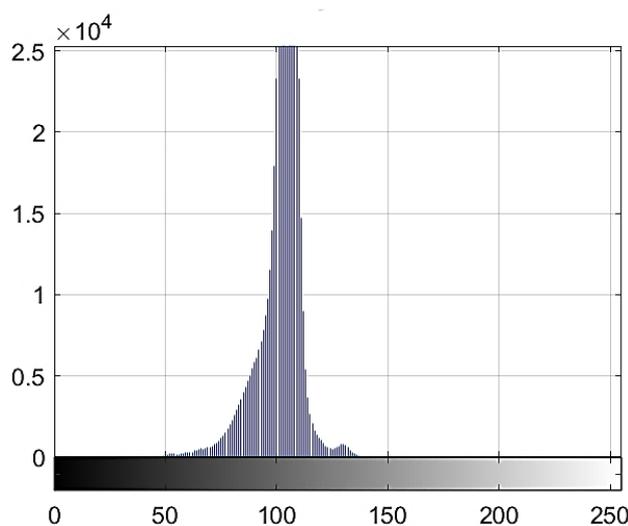


Рис. 2

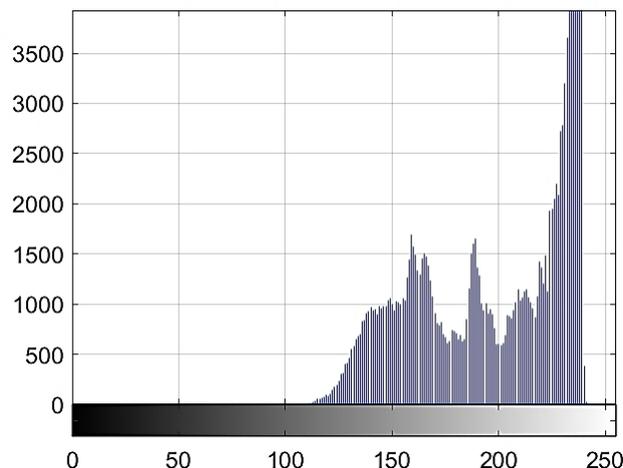


Рис. 3

Характерной особенностью гистограмм является их «узость» — уровни яркости занимают только среднюю часть диапазона яркости.

Хорошо известным способом увеличения контраста является линейное контрастирование [1], предполагающее применение функции преобразования яркости следующего вида

$$s = T(I) = \left(\frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right) (s_{\max} - s_{\min}) + s_{\min}, \quad (1)$$

где $s \in [0,1]$ — яркость результирующего изображения (здесь и далее под яркость будет пониматься нормированная к максимальному значению яркость),

$T(I)$ — функция преобразования,

I — нормированная яркость исходного изображения,

s_{\max}, s_{\min} — максимальная и минимальная яркости результирующего изображения, соответственно,

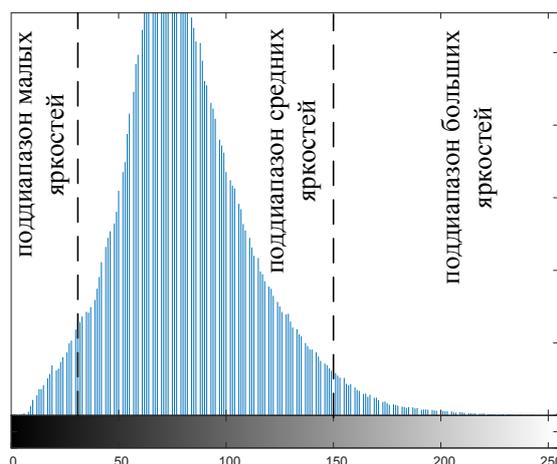
I_{\max}, I_{\min} — максимальная и минимальная яркости исходного изображения, соответственно.

Максимальная контрастность получается при $s_{\min} = 0$ и $s_{\max} = 1$. Тогда формула (1) примет вид

$$s = T(I) = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}.$$

Еще одним известным способом контрастной коррекции является гистограммная эквализация [2], предполагающая выравнивание вероятности появления всех уровней яркости обрабатываемого изображения. Форма гистограммы обработанного изображения при гистограммной эквализации стремится к форме функции плотности вероятности равномерного распределения. Это достигается путем применения функции преобразования яркости, совпадающей по форме с интегральной функцией распределения яркости исходного изображения. Гистограммная эквализация является частным случаем гистограммной подгонки [3] — метода, предполагающего расчет функций преобразования яркости, с помощью которых форма гистограммы обрабатываемого изображения приобретает заданный вид. Преимуществом гистограммной эквализации по сравнению с гистограммной подгонкой под другие виды распределений является то, что равномерное распределение задается единственным легко определяемым параметром. На рис. 4 показаны примеры линейного контрастирования и гистограммной эквализации изображения рис. 1, а и соответствующие им гистограммы яркости.

а)



б)

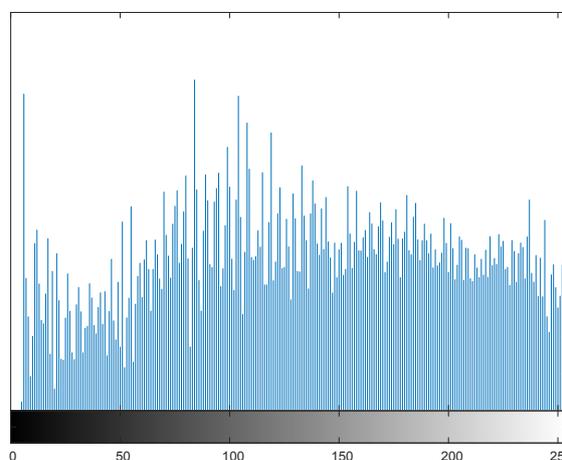


Рис. 4. Примеры линейного контрастирования (а), гистограммной эквализации (б) и гистограммной подгонки (в) изображения рис. 1, а

Визуальный анализ примеров рис. 4, а, б позволяет сделать следующие выводы:

— в результате линейного контрастирования контраст изображения увеличен несущественно;

— в результате гистограммной эквализации контраст увеличен существенно, однако в следствие изменения формы гистограммы произошло изменение исходного соотношения уровней яркости, в частности, изменилась средняя яркость, а также существенно увеличена цветовая насыщенность.

Эффективность линейного контрастирования без внесения значительных изменений в форму гистограммы яркости может быть увеличена за счет применения нелинейной S-образной функции преобразования яркости. Для описания S-образной функции преобразования предлагается использовать следующее выражение, применимое для случая $s_{\min} = 0$ и $s_{\max} = 1$,

$$s = T(I) = \begin{cases} 0, & \text{при } I < I_{\min}; \\ \left(\frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right)^{\gamma_1}, & \text{при } I_{\min} \leq I \leq I_0; \\ \frac{\left(\frac{I_0 - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right)^{\gamma_1 - 1}}{\left(\frac{I_0 - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right)^{\gamma_1 - 1}}, & \text{при } I_{\min} \leq I \leq I_0; \\ 1 - \frac{\left(1 - \left(\frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right) \right)^{\gamma_2}}{\left(1 - \left(\frac{I_0 - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \right) \right)^{\gamma_2 - 1}}, & \text{при } I_0 \leq I \leq I_{\max}; \\ 1, & \text{при } I > I_{\max}, \end{cases}$$

где I_0 — яркость, соответствующая перегибу функции преобразования, γ_1, γ_2 — показатели степени составляющих функции преобразования.

При условии $I_{\min} = 0$ и $I_{\max} = 1$, что может достигаться в случае предварительного применения линейного контрастирования к ис-

ходному изображению, получим более простое выражение

$$s = T(I) = \begin{cases} I^{\gamma_1}, & \text{при } 0 \leq I \leq I_0; \\ 1 - \frac{(1-I)^{\gamma_2}}{(1-I_0)^{\gamma_2-1}}, & \text{при } I_0 \leq I \leq 1. \end{cases} \quad (2)$$

Графики S-образных функции преобразования яркости при различных γ_1, γ_2 и при $I_0 = 0,5, I_{\min} = 0, I_{\max} = 1$ показаны на рис. 5.

При $\gamma_1 = 1$ и $\gamma_2 = 1$ функция преобразования является линейной. Таким образом, линейное контрастирование можно рассматривать как частный случай применения S-образного преобразования яркости.

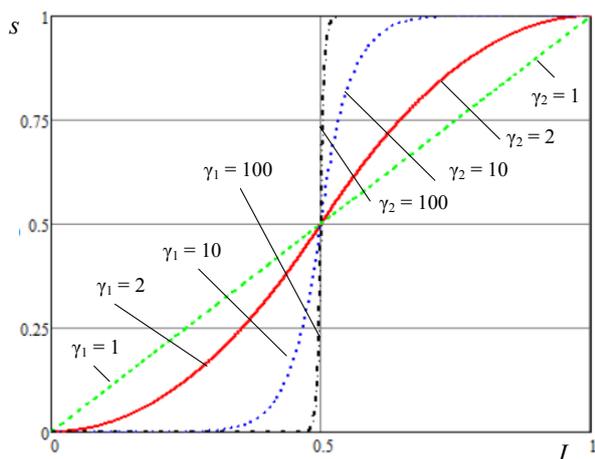


Рис. 5. S-образные функции преобразования яркости при различных значениях γ_1 и γ_2

Рассмотрим пример применения S-образной функции преобразования яркости для контрастной коррекции. На рис. 6, а в одной координатной системе приведены нормированная гистограмма изображения рис. 4, а, линейная и S-образная функции преобразования яркости с $\gamma_1 = 2$ и $\gamma_2 = 2$. Изображение, полученное в результате применения S-образной функции преобразования и его гистограмма показаны на рис. 4, б. Значение точки перегиба S-образной функции I_0 выбрано равным средней яркости обрабатываемого изображения.

Визуальный анализ изображения рис. 6, б позволяет сделать вывод о большей по сравнению с линейным контрастированием эффективности S-образного преобразования яркости для увеличения контраста. При этом увеличе-

ние контраста не сопровождается внесением искажений или потерей качества изображения. Это объясняется тем, что в результате S-образного преобразования яркости произошло сжатие поддиапазонов малых и больших яркостей, которые были представлены в исходном изображении малым количеством пикселей, с одновременным расширением поддиапазона средних яркостей. При этом гистограмма обработанного изображения имеет схожую форму с приблизительно тем же значением средней яркости, что и у исходного изображения.

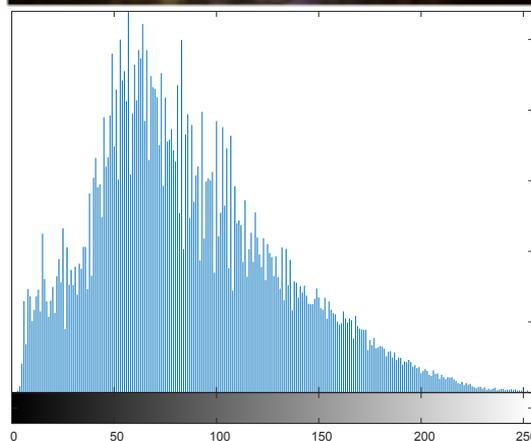
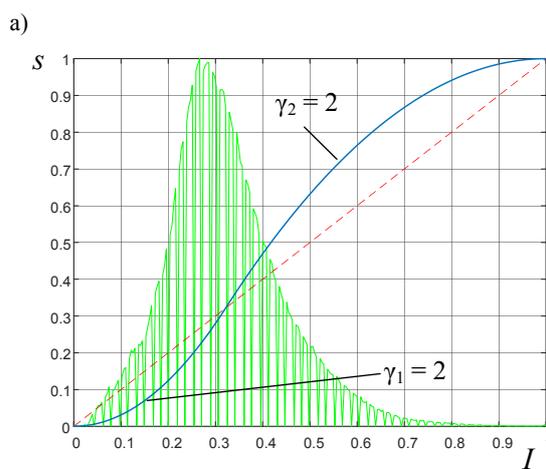


Рис. 6. Пример применения S-образной функции преобразования яркости с $\gamma_1 = 2$ и $\gamma_2 = 2$

Недостатком S-образного преобразования яркости является отсутствие однозначных алгоритмов выбора степеней γ_1 и γ_2 . Поскольку основным эффектом S-образного преобразования яркости является сжатие и растяжение определенных поддиапазонов яркости, предлагается способ количественного определения значений γ_1 и γ_2 , основанный на выделении поддиапазонов яркости, подлежащих сжатию с заданным коэффициентом сжатия.

Для оценки доли пикселей, имеющих яркость в некотором поддиапазоне, используется интегральная функция распределения яркости I

$$F(I_j) = \sum_{j=1}^L p(I_j),$$

где $p(I)$ — гистограмма яркости I , нормированная к числу пикселей изображений
 L — число градаций яркости.

Выбор поддиапазонов яркости, подлежащих сжатию, заключается в выборе границ I_{\min}^*, I_{\max}^* поддиапазонов малых яркостей $I_{\min} \dots I_{\min}^*$ и больших яркостей $I_{\max}^* \dots I_{\max}$, которым соответствует малый процент от общего числа пикселей

$$I_{\min}^* = I, \text{ при } F(I) = \frac{\Delta}{100\%};$$

$$I_{\max}^* = I, \text{ при } F(I) = 1 - \frac{\Delta}{100\%},$$

где Δ — пороговое значение, характеризующее процент пикселей, подлежащий сжатию.

После определения границ I_{\min}^*, I_{\max}^* определяются показатели степени γ_1 и γ_2 в соответствии со следующими выражениями

$$\gamma_1 = \frac{\lg\left(\frac{T_{\text{лин}}(I_{\min}^*)}{k_c I_0}\right)}{\lg\left(\frac{T_{\text{лин}}(I_{\min}^*)}{I_0}\right)};$$

$$\gamma_2 = \frac{\lg\left(\frac{\left(1 - \frac{1}{k_c}\right)\left(1 - T_{\text{лин}}(I_{\max}^*)\right)}{1 - I_0}\right)}{\lg\left(\frac{1 - T_{\text{лин}}(I_{\max}^*)}{1 - I_0}\right)},$$

где k_c — коэффициент сжатия.

Выражения для определения значений γ_1 и γ_2 выведены из формулы (2) таким образом, чтобы в результате S-образного преобразования яркости поддиапазоны больших $I_{\max}^* \dots I_{\max}$ и малых $I_{\min} \dots I_{\min}^*$ яркостей были сжаты в k_c раз.

Параметры преобразования Δ и k_c по сравнению с параметрами γ_1 и γ_2 являются более информативными, то есть между значениями параметров Δ и k_c и результатом обработки существует более понятная и однозначная связь. Также определение значений I_{\min}^*, I_{\max}^* на основе интегральной функции распределения яркости позволяет адаптировать функцию преобразования яркости под конкретное изображение.

Для удобства визуального анализа эффективности предложенного метода по сравнению с существующими на рис. 7-9 приведены примеры обработки малококонтрастных изображений рис. 1-3.

Предлагаемое модифицированное S-образное преобразование яркости может быть также обобщено на случай использования различных значений Δ и k_c для поддиапазонов малых и больших яркостей.



Рис. 7. Примеры обработки изображения рис. 1, а: а) методами линейного контрастирования (б), гистограммной эквализации (в) и предложенным методом (г) с параметрами $\Delta = 0,1$ и $k_c = 2$

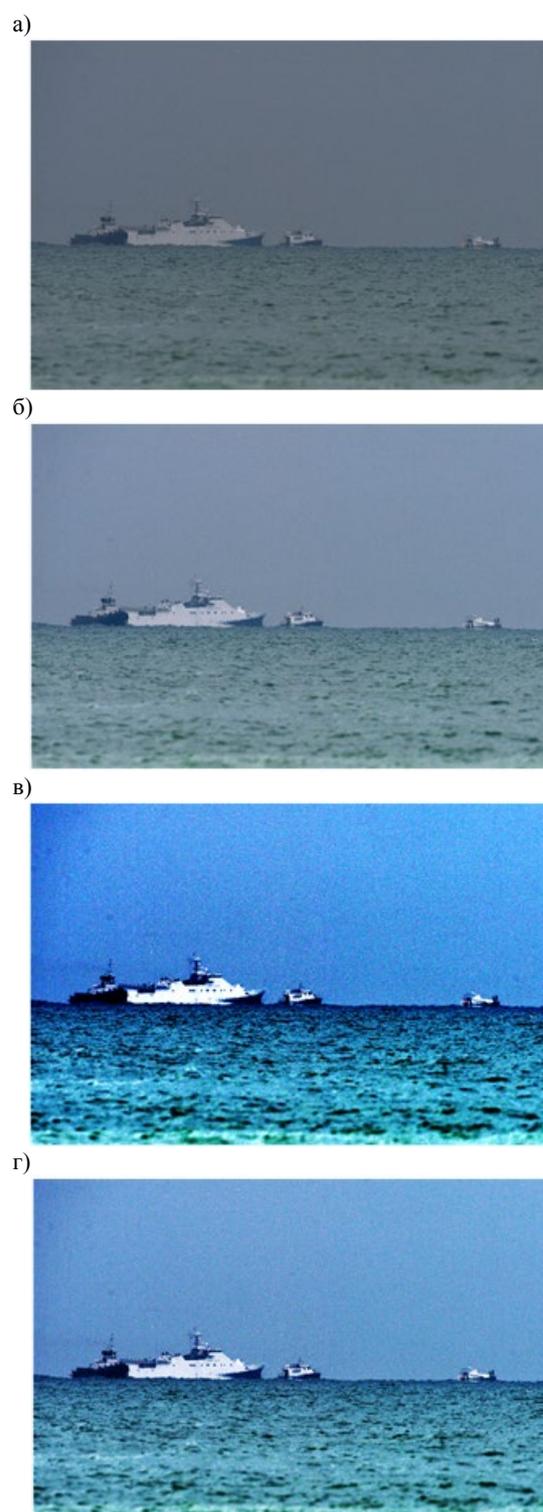


Рис. 8. Примеры обработки изображения рис. 1, б (а) методами линейного контрастирования (б), гистограммной эквализации (в) и предложенным методом (г) с параметрами $\Delta = 0,1$ и $k_c = 2$

Одним из возможных способов автоматизации выбора параметров Δ и k_c может являться итеративная обработка с подбором па-

раметром на основе расчетов метрик качества получаемого изображения.



Рис. 9. Примеры обработки изображения рис. 1, в (а) методами линейного контрастирования (б), гистограммной эквализации (в) и предложенным методом (г) с параметрами $\Delta = 0,1$ и $k_c = 2$

Заключение

Предложен метод контрастирования изображений средствами модифицированного S-образного преобразования яркости, предполагающего сжатие поддиапазонов больших и малых яркостей, представленных заданным процентом пикселей изображения, в заданное число раз. Приведены аналитические выражения для расчета показателей степени S-образной функции преобразования яркости. Приведены примеры обработки малоcontrastных изображений предлагаемым методом и известными методами контрастной коррекции.

Литература

1. Цифровая обработка изображений в информационных системах / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых, Г.И. Перетягин, А.А. Спектор. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 352 с.
2. Краткий курс теории обработки изображений // Сообщество Экспонента. URL: <https://hub.exponenta.ru/post/kratkiy-kurs-teorii-obrabotki-izobrazheniy734> (дата обращения: 13.03.2023).
3. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М.: Техносфера, 2006. 618 с.

Поступила 13.03.2023; принята к публикации 13.04.2023

Информация об авторах

Начаров Денис Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры электронная техника, Севастопольский государственный университет (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33), e-mail: d.v.nacharov@sevsu.ru, тел. +7 978 811 46 24, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2445-1140>

**IMAGE CONTRAST ENHANCEMENT
BY MEANS OF MODIFIED S-SHAPED INTENSITY TRANSFORM**

D.V. Nacharov

Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

Abstract: a method for digital images contrast enhancement by means of a modified S-shaped transform is considered. The method supposes an approach to measure quantitative values and inflection points of the intensity transform function. In the introduction the classes of images to which the proposed method is applicable are listed. Also in introduction a brief discussion of image contrasting methods such as linear contrasting, stepwise image transformation, histogram matching, and histogram equalization is given. In the main part of the article examples of low-contrast images, examples of their processing by known methods are presented. Analysis of advantages and disadvantages of known methods is given. The main idea of the proposed method, which consists in the analytical determination of the S-shaped brightness transformation function exponents based on the determination of the boundaries of the brightness subranges to be compressed with a given coefficient using the intensity cumulative distribution function is formulated. examples of processing real images of various contents are given for the purpose of visual analysis of the effectiveness of the proposed contrast enhancement method comparing with known methods. The results of the advantages and disadvantages analysis of the proposed method are presented, an approach to the automated intensity transform quantitative parameters estimation is proposed. In conclusion the main results of the study are briefly characterized

Keywords: intensity, contrast, image, histogram, subrange, nonlinear transform

References

1. Gruzman I.S., V.S. Kirichuk, G.I. Peretyagin, Spector A.A. "Digital image processing in information systems" (Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v informatsionnykh sistemakh"), Novosibirsk: Izd-vo NSTU, 2002, 352 p.
2. Brief course of image processing (Kratkiy kurs teorii obrabotki izobrazhenii), Exponenta Community, available at: <https://hub.exponenta.ru/post/kratkiy-kurs-teorii-obrabotki-izobrazheniy734> (request date: 13.03.2023).
3. Gonzalez R.C., Woods R.E., Eddins S. L. "Digital image processing using MATLAB", NJ: Prentice-Hall, Inc., 2003, 624 p.

Submitted 13.03.2023; revised 13.04.2023

Information about the authors

Denis V. Nacharov, Cand Sc. (Technical), Associate Professor, Department "Electronic engineering", Sevastopol State University (33 Universitetskaya str., Sevastopol 299053, Russia), e-mail: d.v.nacharov@sevsu.ru, tel.: +7 978 811 46 24, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2445-1140>

Радиотехника и связь

DOI 10.36622/VSTU.2023.19.2.015
УДК 621.382

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА С НЕСКОЛЬКИМИ ПОЛОСАМИ ПРОПУСКАНИЯ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ 5G

А.В. Башкиров, Р.Н. Хорошайлов, И.А. Турецкий

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлены методика и реализация реконфигурируемого фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ) с использованием логики управления, которая подходит для разрешения нескольких полос частот с помощью одного фильтра с конечной характеристикой и множественного набора коэффициентов. В среде Matlab/Simulink разработана модель для исследования производительности желаемого КИХ-фильтра более высокого порядка. Эквивалентное представление КИХ-фильтра разработано компилятором Xilinx с использованием экспортированных коэффициентов фильтра. Процесс реализации на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) завершен с помощью Xilinx ISE 14.5 и проведен анализ, как КИХ-фильтр более высокого порядка влияет на использование ресурсов ПЛИС, и его максимальной рабочей частоты. Для получения нескольких полос частот использовался автоматический выбор коэффициентов. Высокая скорость передачи данных, эффективность использования площади и несколько фильтров полосы пропускания являются ключевыми факторами для связи 5G. Эффективный реконфигурируемый КИХ-фильтр был реализован с архитектурой КИХ на основе блоков умножения-сложения (MAC). Результат моделирования предлагаемой архитектуры показывает, что она может сэкономить от 79,8 % до 83,3 % 4 входных справочных таблиц (LUT) и требует только 33 % регистров среза

Ключевые слова: фильтр с конечной импульсной характеристикой, программируемая логическая интегральная схема, моделирование, цифровая обработка сигналов

Введение

Цифровая обработка сигналов приобрела большую популярность в цифровом мире в последние десятилетия благодаря своей способности эффективно преобразовывать цифровые и /или аналоговые сигналы за счет снижения затрат, связанных с проектированием и внедрением. Таким образом, цифровая обработка сигналов (ЦОС) стала конкурентом аналоговой обработке сигналов, заменив большое количество ее приложений. ЦОС может использоваться в различных приложениях, некоторые из которых связаны со скоростью, обработкой изображений и звука. Хотя ЦОС могли быть реализованы в цифровых сигнальных процессорах, вехой во внедрении цифровой обработки сигналов стало появление в 1980-х годах программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Фильтры с импульсной характеристикой конечной длины (КИХ) являются одним из наиболее часто используемых алгоритмов цифровой обработки сигналов. ПЛИС – это аппаратное обеспечение, используемое в настоящее время для реализации КИХ-фильтра из-за его высокой скорости,

низкой стоимости и низкого рассеивания мощности. Существует много различных производителей ПЛИС с различными аппаратными архитектурами.

Основными компонентами цифровых КИХ-фильтров, разработанных на ПЛИС, являются банк регистров для сохранения выборки сигналов, сумматор для реализации операций сложения и множитель для умножения коэффициентов фильтра на выборки сигналов. Хотя проектирование и реализация цифровых КИХ-фильтров кажутся простыми, слабым местом конструкции является блок умножения скорости, энергопотребления и занимаемой площади на ПЛИС [1]. Умножители являются неотъемлемой частью структур КИХ, и они используют большую часть площади микросхемы. Это ограничивает количество обрабатываемых элементов (ОЭ), доступных на микросхеме, для реализации фильтра более высокого порядка.

Постановка задачи

Реконфигурируемый КИХ-фильтр с несколькими полосами частот может быть реализован с помощью блока генерации коэффициентов. Для определенной полосы частот выбор

коэффициентов должен быть выполнен правильно. Ширина полосы пропускания и полосы перехода зависит от количества коэффициентов и их точности. Конструкция реконфигурируемого КИХ-фильтра с регулируемой полосой пропускания может быть выполнена с несколькими наборами коэффициентов.

Предлагается, чтобы КИХ-фильтр с несколькими полосами пропускания зависел от частоты входного сигнала, а выбор полосы пропускания зависел от частоты входного сигнала. В конструкции КИХ-фильтра используются блок выбора частоты, блок управления и КИХ-фильтр, как показано на рис. 1.

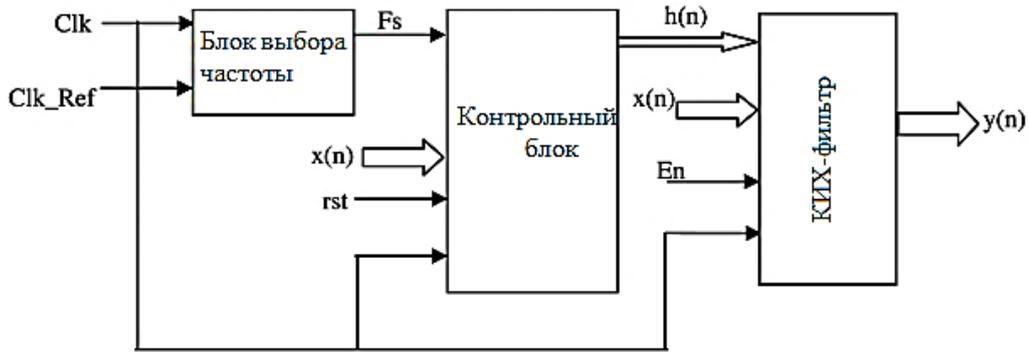


Рис. 1. Блок-схема предлагаемого реконфигурируемого КИХ-фильтра с логикой управления

Блок выбора частоты получает два входных сигнала, т. е. тактовый сигнал и опорный тактовый сигнал. Блок выбора частоты формирует решение на основании того, является ли частота входного сигнала выше или ниже опорного тактового сигнала [2]. Выход блока выбора частоты – F_s .

Блок контроллера имеет конечный автомат, который будет генерировать требуемый набор коэффициентов для КИХ-фильтра. Конечный автомат состоит из четырех состояний, состояние 0 — начальное состояние, состояние 1 — условное состояние, состояние 2 — выбор коэффициентов первой полосы пропускания, а состояние 3 — отвечает за выбор коэффициентов второй полосы пропускания. Контроллер получает выборку входного сигнала, тактовый сигнал, разрешение и F_s . На основании решения, принятого блоком выбора частоты, контроллер формирует коэффициенты. КИХ-фильтр реализован с КИХ-фильтром МАС. Объем логики умножения может быть дополнительно уменьшен с помощью метода распределенного алгоритма (DA), который использует LUT для хранения частичных произведений умножения. Следовательно, общая вычислительная логика сокращается, что также приводит к снижению энергопотребления.

Структура умножения и накопления используется в конструкции КИХ-фильтра. Выходной сигнал КИХ-фильтра для фильтра с отводом N определяется уравнением (1).

$$y[n] = \sum x[k]x[n - k], \quad \text{где } k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (1)$$

Это дает свертку последних N выборок с коэффициентами $h(k)$. Обычная реализация фильтра с выделенной задержкой показана на рис. 2. Для вычисления $y[n]$ требуется $N-1$ число сложений и N число умножений, а реализованная структура выполнена в форме умножения и накопления (МАС). Но для этого требуется "N" количество циклов МАС перед выборкой следующего входного образца. Следовательно, реализация параллельных МАС-структур увеличивает скорость работы в N раз.

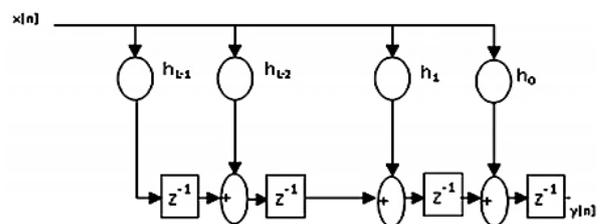


Рис. 2. КИХ-фильтр на основе МАС

Входной сигнал $x(n)$ применяется к модулю filter_fir вместе с $h(k)$, enable (en) и clock (clk). Фазовый детектор первоначально сравнивает тактовый сигнал с эталонным тактовым сигналом и, в зависимости от значения тактового сигнала, генерирует выходной сигнал (F_s). Сигнал F_s содержит двоичное значение true или false. Блок управления состоит из двух наборов коэффициентов и выбирает только один набор одновременно на основе значения

F_s . В логике управления имеется конечный автомат с минимум четырьмя состояниями. Начальное состояние конечного автомата проверяет наличие сигналов Start и clear (clr). Если оба сигнала включены, то он переходит во второе состояние. Второе состояние является условным состоянием и выбирает следующее состояние на основе значения F_s . Состояния три и четыре имеют разный набор коэффициентов. Второе состояние выбирает только одно состояние и, следовательно, один набор коэффициентов.

Разработка методики проектирования

В среде Matlab/Simulink разрабатывается модель для исследования производительности реконфигурируемого КИХ-фильтра. Поток проектирования моделируется и тестируется с помощью System Generator, инструмента моделирования системного уровня, доступного от Xilinx. System Generator можно использовать для проектирования и тестирования систем ЦОС на ПЛИС в среде Matlab/Simulink. КИХ-фильтр разработан в FDATool путем установки характеристик фильтра в соответ-

ствии с табл. 1, и проверяется его частотная характеристика, чтобы измерить, насколько конструкция соответствует параметрам фильтра. Как только желаемый отклик фильтра будет достигнут, коэффициенты фильтра экспортируются в рабочее пространство Matlab. Эквивалентное представление КИХ-фильтра разработано в Xilinx с использованием экспортированных коэффициентов КИХ-фильтра. Поток реализации Xilinx завершается с помощью Xilinx ISE 13.2.

Таблица 1

Параметры полосового КИХ-фильтра		Значение
Порядок использования КИХ-фильтра		182
Частота дискретизации, F_s		3 МГц
Частота полосы задержания F_{stop}		560 кГц
Частота полосы пропускания F_{pass}		600 кГц
Частота полосы пропускания F_{pass}		900 кГц
Частота полосы задержания F_{stop}		940 кГц

КИХ-фильтр будет разработан в среде моделирования Simulink с использованием специфичных для Xilinx наборов блоков, как показано на рис. 3 и рис. 4.

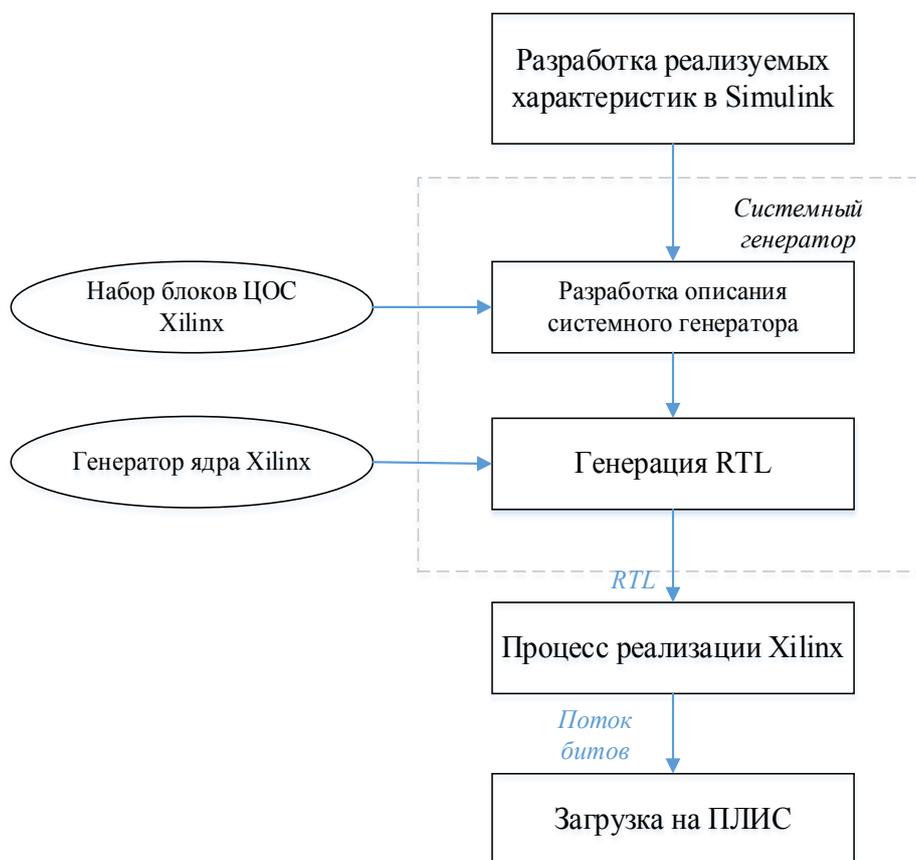


Рис. 3. Методика разработки КИХ-фильтра

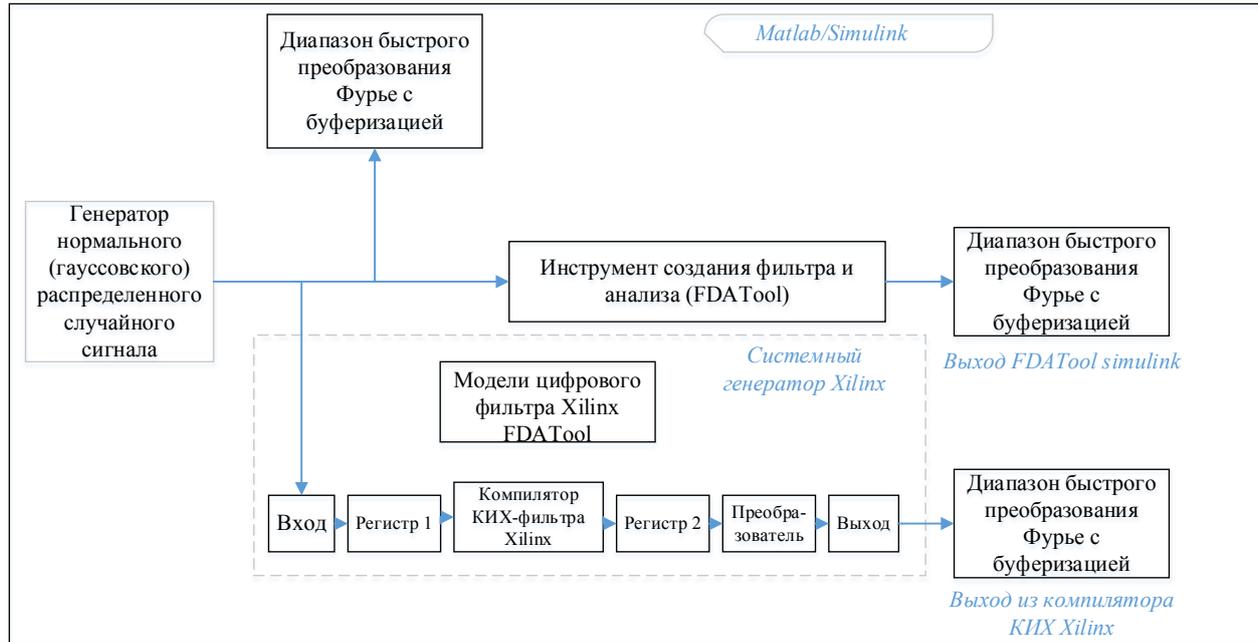


Рис. 4. Системная модель КИХ-фильтра в среде Matlab/Simulink с использованием системного генератора Xilinx

System Generator использует блок компилятора конечной импульсной характеристики, который помогает использовать выделенные аппаратные ресурсы, доступные в устройствах Virtex, для создания оптимизированных реализаций ПЛИС разработанной модели

Реализация КИХ-фильтра с несколькими полосами пропускания

Выбор полосы пропускания фильтра зависит от правильного выбора коэффициентов фильтра, а также от количества отводов. Высокая точность коэффициентов уменьшает содержание пульсаций в характеристиках филь-

тра. Для анализа работы КИХ-фильтра МАС из 8 бит с пятью отводами табличная форма представлена в табл. 2. Значение входной выборки $x(n)$ при каждом входном тактовом импульсе показано в первой строке таблицы, а значения коэффициентов берутся от $h(0)$ до $h(4)$ как 1, 2, 2, 2 и 1 соответственно [3]. Выходные выборки фильтра $y(n)$ приведены в последнем столбце, а значения в прямоугольном поле будут доступны на выходе фильтра. Поскольку количество отводов фильтра равно пяти, вывод $y(n)$ действителен после пятой выборки, т.е. из $N(5)$. Выходные значения можно сравнить с формой сигнала, представленной на рис. 5.

Таблица 2

Матрица отклика КИХ-фильтра для $n = 4$

$x(n)>$	2	1	3	4	1	3	3	4	2	0	0	$y(n)$
N(0)	1											2
N(1)	2	1										5
N(2)	2	2	1									9
N(3)	2	2	2	1								16
N(4)	1	2	2	2	1							19
N(5)		1	2	2	2	1						19
N(6)			1	2	2	2	1					20
N(7)				1	2	2	2	1				20
N(8)					1	2	2	2	1			21
N(9)						1	2	2	2	1		20
N(10)							1	2	2	2	1	15
N(11)								1	2	2	2	8

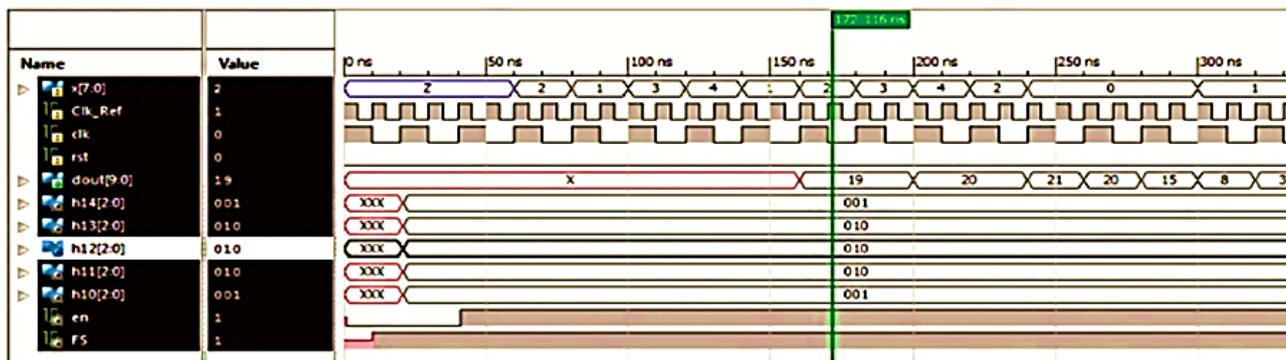


Рис. 5. Результат моделирования реконфигурируемого КИХ-фильтра

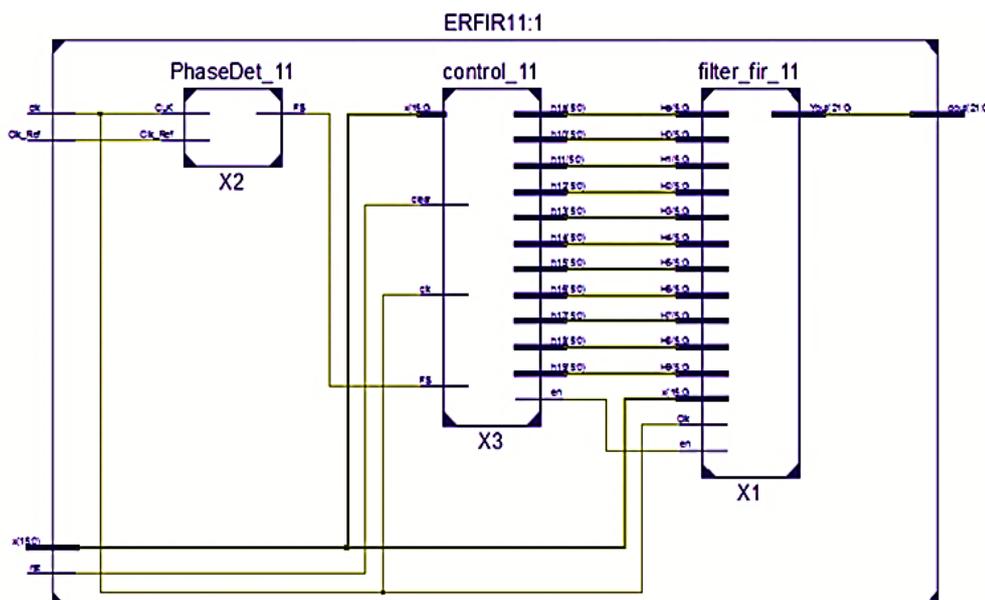


Рис. 6. Принципиальная схема реконфигурируемого КИХ-фильтра

Реконфигурируемы КИХ-фильтр с логикой управления для эффективной площади и низкого энергопотребления представлен с 11 ответвлениями и 16 битами на рис. 6. Блок-схема предлагаемого фильтра была реализована и показана на принципиальной схеме. Реализованная конструкция сравнивается с результатами моделирования КИХ-фильтра сложной прямой формы (FDF) и развернутой прямой формы (UDF) многоразовых конструкций SoC. Два набора коэффициентов для фильтра были выбраны из MATLAB R2021a. Две полосы пропускания фильтра выбираются как от $\omega_{p1} = 0,15\pi$ до $\omega_{p2} = 0,35\pi$ и от $\omega_{p3} = 0,55\pi$ до $\omega_{p4} = 0,7\pi$. Коэффициенты фильтра для обеих полос пропускания получены из MATLAB и нормализованы к целочисленным значениям.

Функция, используемая для генерации коэффициентов для указанной полосы пропускания, дана в уравнении (2).

$$b = fir1(n, w_n, f_{type}), \quad (2)$$

где n – порядок фильтра, w_n - пропускная способность фильтра, f_{type} указывает тип фильтра.

Окно по умолчанию, используемое в функции для генерации коэффициентов фильтра, представляет собой метод окна Хэмминга [4]. Чтобы сгенерировать коэффициенты полосового фильтра, значение w_n задается как ω_{p1} и ω_{p2} . Аналогично для следующего набора коэффициентов значение w_n задается как ω_{p3} и ω_{p4} . Сгенерированные коэффициенты имеют типы по умолчанию как double и float. Соответственно, все коэффициенты имеют дробные числа. Следовательно, трудно использовать коэффициенты непосредственно в проекте фильтра. Чтобы избежать больших дробных чисел, рекомендуется нормализовать дробные числа в целые значения. Коэффициент норма-

лизации, используемый в реализации для преобразования дробных чисел в целые числа, равен 64, а затем округляется до ближайшего целого значения. Диапазон коэффициентов, сгенерированных после нормализации, составляет от -32 до 31. Следовательно, выбранное количество битов для коэффициентов равно 6 битам. Для создания резких переходных полос и меньшего количества пульсаций в полосе задерживания требуется большее количество коэффициентов и значения коэффициентов с высокой точностью. Следовательно, размер коэффициента также должен быть увеличен.

Блок управления хранит два набора коэффициентов в виде справочной таблицы и подает только один набор коэффициентов в КИХ-фильтр на основе частоты тактового сигнала. Амплитудные и фазовые характеристики обоих наборов коэффициентов показаны на рис. 7 и рис. 8.

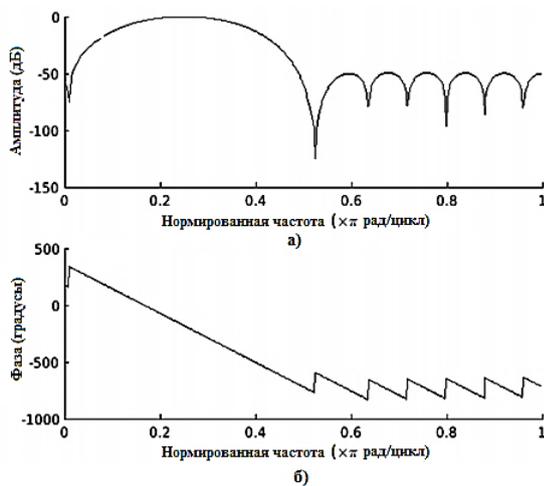


Рис. 7. Амплитудно-фазовый диапазон от $\omega_{p1} = 0,15\pi$ до $\omega_{p2} = 0,35\pi$

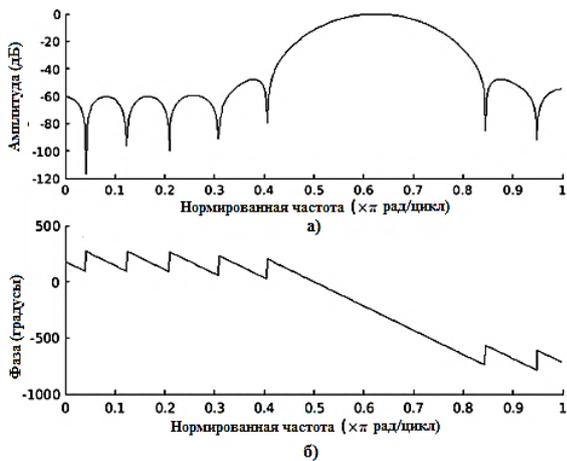


Рис. 8. Амплитудно-фазовый диапазон от $\omega_{p3} = 0,15\pi$ до $\omega_{p4} = 0,70\pi$

Ось x кривых амплитудной и фазовой характеристик обозначена нормированной частотой в радианах/циклах. Нормированная частота обычно обозначается для представления цифровых сигналов. Схема фазового детектора должна выдавать свое решение в зависимости от значения опорного сигнала и входного тактового сигнала. Фазовый детектор используется для сравнения опорного тактового сигнала с входным тактовым сигналом, и решение принимается на основе значений обоих сигналов. Для большего количества полос пропускания требуется генерировать несколько опорных сигналов. Ширина выходного сигнала фазового детектора зависит от количества требуемых полос пропускания. Управляющая логика выберет один набор коэффициентов, хранящихся в LUTs. Для каждой конкретной полосы пропускания будет существовать набор коэффициентов. Конечный автомат внутри управляющей логики выбирает любой набор коэффициентов на основе решения, принятого схемой фазового детектора.

Результаты моделирования

Реконфигурируемый КИХ-фильтр с управляющей логикой с 11 отводами и 16 битами был смоделирован в симуляторе Xilinx ISE с устройством Virtex4 XC4VFX12 [3, 5]. Результаты моделирования сравниваются с конструкциями SoC многократного использования в свернутой прямой форме (FDF) и развернутой прямой форме (UDF).

Коэффициенты, сгенерированные с использованием MATLAB R2021a, перечислены в табл. 3. Эти два набора коэффициентов хранятся в блоке управления, и один из наборов будет автоматически подаваться в КИХ-фильтр на основе значения тактового сигнала. Принципиальная схема, сгенерированная после синтеза с помощью RTL schematic, показана на рис. 6.

Таблица 3

Коэффициенты для выбранных полос пропускания

Коэффициент	h0	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7/h8	h9	h _a	h _b	
Первый набор	0	-2	-6	-5	7	21	21	7	-5	-6	-2	0
Второй набор	0	2	6	3	-18	12	12	-18	3	6	-2	0

Устройства, такие как один блок МАС размером от 16×7 до 22, девять умножителей 16×7 , девять сумматоров 16×7 и регистры, используемые в реализации, перечислены в табл. 4. Размеры МАС, умножителей и адреса будут варьироваться в зависимости от разрядности входного сигнала и коэффициентов.

Результаты моделирования, представленные на рис. 5, показывают, что многополосный реконфигурируемый КИХ-фильтр с 16 битами и 11 выводами был реализован с использованием той же архитектуры, что и модель фильтра на основе МАС. Сравнение использования площади всегда производится на основе количества LUT, занятых в проекте, для предлагаемой реализации используется очень небольшое количество 4 входных LUT. Замечено, что предлагаемая реализация требует на 79,8 % меньшего количества 4 входных LUT, чем существующая архитектура UDF, и на 83,3 % меньшего количества LUT, чем архитектура FDF.

Таблица 4
Расширенная статистика макроуровней HDL

Устройство	Количество единиц для фильтра с порядком(n) 11
16×7-22-разрядный МАС	1
16×7-разрядный умножитель	9
16×7-битный регистровый умножитель	1
16-разрядный сумматор	9
Триггер	133
1-разрядная защелка	1
6-разрядная защелка	10

Характеристики рабочей частоты и синхронизации представлены в табл. 5.

Таблица 5
Отчет о рабочей частоте и временном интервале

Параметр	Фильтр с порядком(n) 4	Фильтр с порядком(n) 11
Минимальный период времени	1,353 нс	1,353 нс
Максимальная рабочая частота	738,962 МГц	738,962 МГц
Мин. время прибытия I/P до тактового сигнала	5,606 нс	15,269 нс
Макс. время прибытия I/P до тактового сигнала	4,997 нс	5,405 нс

Заключение

Разработан реконфигурируемый КИХ-фильтр с использованием логики управления, которая подходит для разрешения нескольких полос частот с помощью одного КИХ-фильтра и множественного набора коэффициентов. Реализованная конструкция требует меньше места на кристалле по сравнению с существующими архитектурами для фильтров с несколькими полосами пропускания. Для получения нескольких полос частот использовался автоматический выбор коэффициентов. Высокая скорость передачи данных, эффективность использования площади и несколько фильтров полосы пропускания являются ключевыми факторами для связи 5G. Эффективный по области реконфигурируемый КИХ-фильтр был реализован с архитектурой КИХ на основе МАС. Результат моделирования предлагаемой архитектуры показывает, что она может сэкономить от 79,8 % до 83,3 % 4 входных LUT и требует только 33 % регистров среза по сравнению с существующими архитектурами КИХ-фильтров UDF и FDF. Общая мощность, потребляемая устройством, составляет 177,7 мВт, а потребляемая статическая мощность составляет около 166,6 мВт. Реализованное устройство может работать на максимальной частоте 738 МГц.

Литература

1. Jawahar A. and Latha P. P. Implementation of high-order FIR digital filtering for software defined radio receivers // Proc. Int. Conf. Signal Process. Commun. Power Embedded Syst. (SCOPEs), 2016. Pp. 1452–1456.
2. Ababneh J. I., Bataineh M. H. Linear phase FIR filter design using particle swarm optimization and genetic algorithms // Digit. Signal Process. 2008. Vol. 18. № 4. Pp. 657–668.
3. Хорошайлова М.В. Архитектура для стохастических LDPC-декодеров с использованием эффективной площади кристалла на основе ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 1. С. 95-100.
4. Lysaght P. and McCabe C., Exploring Zynq MPSoC: With PYNQ and Machine Learning Applications, ch. 22. Glasgow, U.K.: Strathclyde Academic, 2019. Pp. 525–552.
5. Хорошайлова М.В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 99-105.

Информация об авторах

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

Хорошайлов Роман Николаевич – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: hrn3001@mail.ru

Турецкий Иван Андреевич - студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: tav7@mail.ru

DESIGN METHODOLOGY AND IMPLEMENTATION OF A DIGITAL FILTER WITH MULTIPLE PASS BANDS FOR 5G APPLICATIONS

A.V. Bashkirov, R.N. Khoroshailov, I.A. Turetskiy

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article presents a technique and implementation of a reconfigurable filter with a finite impulse response (FIR) using control logic, which is suitable for resolving multiple frequency bands using a single filter with a finite characteristic and a multiple set of coefficients. In the Matlab/Simulink environment, a model has been developed to study the performance of the desired higher-order FIR filter. An equivalent representation of the FIR filter is developed by the Xilinx compiler using exported filter coefficients. The FPGA implementation process was completed using Xilinx ISE 14.5 and an analysis was carried out of how a higher-order FIR filter affects the use of FPGA resources and its maximum operating frequency. Automatic selection of coefficients was used to obtain several frequency bands. High data transfer rates, area utilization efficiency and multiple bandwidth filters are key factors for 5G communications. An efficient reconfigurable FIR filter has been implemented with a FIR architecture based on multiplication-addition blocks (MAC). The result of modeling the proposed architecture shows that it can save from 79.8% to 83.3% of 4 input reference tables (LUT) and requires only 33% of the slice registers

Key words: FIR filter, FPGA, modeling, digital signal processing

References

1. Jawahar A., Latha P.P. "Implementation of high-order FIR digital filtering for software defined radio receivers", proc. int. conf. *Signal Process. Commun. Power Embedded Syst. (SCOPEs)*, 2016, pp. 1452–1456.
2. Ababneh J.I., Bataineh M.H. "Linear phase FIR filter design using particle swarm optimization and genetic algorithms", *Digit. Signal Process.*, 2008, vol. 18, no. 4, pp. 657–668.
3. Khoroshailova M.V. "Architecture for stochastic LDPC decoders using the effective crystal area based on FPGA", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 95–100.
4. Moore A.L., Shi L. "Emerging challenges and materials for thermal management of electronics", *Mater.*, 2014, vol.17 (4), pp. 163–174.
4. Lysaght P., McCabe C. "Exploring Zynq MPSoC: With PYNQ and Machine Learning Applications", ch. 22, Glasgow, U.K.: Strathclyde Academic, 2019, pp. 525–552.
5. Horoshaylova M.V. "Architecture of FPGA based channel coding for 5G wireless network using high-level synthesis", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp.99-105.

Submitted 27.02.2023; revised 19.04.2023

Information about the authors

Aleksey V. Bashkirov, Dr. of Sc. (Technical), Head of the Department of Design and Production of Radio Equipment, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru

Roman N. Khoroshailov, Master's student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: hrn3001@mail.ru

Ivan A. Turetskiy, Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: tav7@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ НАПРАВЛЕННОГО ПРИЕМА

С.В. Бирюков

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация: проводятся исследования, связанные с взаимодействием электроиндукционного цилиндрического датчика напряженности электрической составляющей электромагнитного поля (ЭП) направленного приема с однородным полем свободного пространства и неоднородным полем линейного заряда. Устанавливается взаимосвязь между измеряемой напряженностью электрического поля, индуцированными на чувствительных элементах датчика зарядами и конструктивными параметрами датчика. Полученные результаты легли в основу разработки датчика напряженности ЭП направленного действия с требуемыми метрологическими характеристиками. Датчик состоит из проводящего цилиндра радиуса R и высотой h и двух цилиндрических чувствительных элементов, конструктивные параметры которых задаются угловыми θ_0 и линейными R и h размерами. Приводятся выражения чувствительности датчика и его погрешности от неоднородности поля и проводится их оценка. Оценка показывает возможность использования датчика как в свободном пространстве, так и вблизи источника поля. В свободном пространстве, ограниченном пространственным диапазоном измерения $0 < a \leq 0.5$ ($d = 2R$) при $\theta_0 = 58^\circ$, погрешность от неоднородности поля датчика будет не более $\pm 0,2\%$. Вблизи источника поля, ограниченного пространственным диапазоном $a < 1$ ($d < 2R$) при $\theta_0 = 53^\circ$, погрешность датчика составит не более $\pm 2,5\%$. Чувствительного датчика составляет $(25 \div 100)$ мВ/м

Ключевые слова: напряженность, поле, электромагнитное, электрическое, датчик электрического поля, цилиндрический датчик, датчик направленного приема, чувствительность, погрешность

Введение

В настоящее время широко распространены высоковольтные линии электропередач (ЛЭП) и подстанции (ПС) 110, 330, 750 и 1150 кВ в зону, воздействий которых попадает большое количество различных радиокомплексов, радиосистем и радиостанций. Это приводит к повышенному уровню помех, тресков и шумов при обеспечении радиосвязи вблизи ЛЭП и ПС [1]. Источником этих помех является напряженность электрической составляющей электромагнитного поля (ЭП). В области низких частот электромагнитное поле распадается на магнитное поле и электрическое поле (ЭП). Нас будет интересовать воздействия электрической составляющей электромагнитного поля на радиокомплексы, радиосистемы и радиостанции. В связи со сказанным, измерение напряженности низкочастотного (ЭП) в зонах повышенного влияния ЛЭП и ПС, является одним из способов решения проблемы. Поэтому вопросы, связанные разработкой датчиков напряженности низкочастотного электрического поля актуально в радиотехнике, а также в приборостроении энергетике и других областях промышленности. В [1] было выявлено, что

помехи ЛЭП в большинстве случаев имеют вертикальную поляризацию. Это позволяет использовать для измерения приборы с однокоординатными электроиндукционными датчиками. Однокоординатные датчики напряженности ЭП относятся к датчикам направленного приема [2].

Датчики напряженности ЭП [3-13] электроиндукционного типа являются основой для построения измерителей напряженности ЭП в низкочастотном диапазоне. Принцип действия датчиков основывается на явлении электростатической индукции. Сущность этого явления заключается в наведении электрических зарядов $q(t)$ на проводящих поверхностях, внесенных в ЭП

$$q(t) = \iint_S \sigma(t) \cdot dS, \quad (1)$$

где $\sigma(t) = \varepsilon_0 \varepsilon E_R(t)$ – поверхностная плотность заряда; $E_R(t)$ – радиальная составляющая вектора напряженности ЭП на поверхности цилиндра; dS – элемент проводящей поверхности; S – площадь проводящей поверхности.

Проводящая поверхность, являющаяся основой электроиндукционных датчиков, может иметь различную форму:

1) цилиндрическую в виде сплошного и пустотелого цилиндра [3 - 5];

2) сферическую в виде шара или сферы [6, 7];

3) планарную в виде прямоугольника, квадрата, круга и др. [8 - 10];

4) кубическую в виде сплошного или пустотелого куба [11 - 13].

Многообразии проводящих поверхностей электроиндукционных датчиков напряженности ЭП, вызвано различными

областями их применения. Так, например, датчики с цилиндрической поверхностью могут использоваться для измерения радиальных полей, датчики со сферической и кубической поверхностью для измерения пространственных полей, датчики с планарной поверхностью используются для измерения одно направленных полей.

Электроиндукционным датчикам ЭП цилиндрической формы в научно-технической литературе уделяется мало внимания, хотя перспективность их использования очевидна. В связи с этим, данная и последующая работы автора будут посвящены разработке датчиков цилиндрической формы. В первой статье будет рассмотрен электроиндукционный датчик цилиндрической формы направленного приема.

Постановка задачи

Из вышесказанного вытекает необходимость решения следующих задач:

1) исследовать взаимодействие проводящего цилиндра с однородным полем и полем линейного заряда для получения выражения поверхностной плотности заряда на поверхности проводящего цилиндра;

2) предложить конструкцию электроиндукционного цилиндрического датчика напряженности ЭП направленного приема;

3) установить взаимосвязь между электрическим зарядом проводящей поверхности цилиндра и геометрическими параметрами датчика.

4) оценить метрологические характеристики датчика.

Теория

Теоретические исследования взаимодействия проводящего цилиндра с однородным полем свободного пространства и неоднородным полем линейного заряда. Целью исследования является получение выражений плотности заряда на поверхности проводящего цилиндра.

Рассмотрим проводящий цилиндр в однородном ЭП (рис. 1).

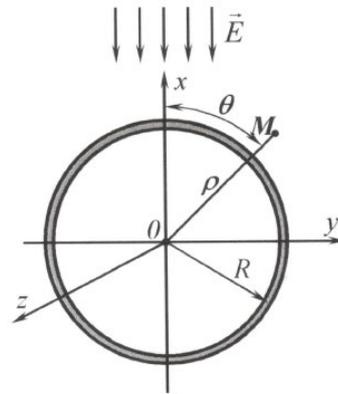


Рис. 1. Поперечное сечение проводящего цилиндра в однородном поле

Выберем вне цилиндра произвольную точку M . Положение точки M в пространстве зададим цилиндрическими координатами ρ и θ . Тогда для точки M ($\rho > R$) вне проводящего цилиндра ЭП можно описать с помощью потенциала $\varphi = \varphi(\rho, \theta)$. Этот потенциал в полярных координатах будет удовлетворять двумерному уравнению Лапласа и на поверхности проводящего цилиндра $\rho = R$ обращается в нуль. С учетом принятых обозначений получим для произвольной точки M выражение потенциала в зависимости от пространственных переменных ρ и θ при нахождении проводящего цилиндра в однородном поле [14]:

$$\varphi_M = -\varepsilon_0 \varepsilon E \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{R^2}{\rho^2}\right) \cdot \cos \theta. \quad (2)$$

По выражению (2) найдем градиент потенциала произвольной точки M вне цилиндра. По нему определим вектор напряженности результирующего поля:

$$\vec{E}_M = -grad \varphi = -\left(\vec{e}_\rho \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} + \vec{e}_\theta \frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \vec{e}_z \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right). \quad (3)$$

Производные потенциала φ , входящие в выражение (3) найдем из выражения (2) и определим составляющие напряженности ЭП, входящие в выражение (3). Проанализируем эти составляющие.

Первая составляющая

$$E_R = \varepsilon_0 \varepsilon E \cdot \left(1 + \frac{R^2}{\rho^2}\right) \cdot \cos \theta - \text{радиальная.}$$

В однородном ЭП при $\rho=R$ это плотность электрического заряда на поверхности цилиндра:

$$\sigma = \sigma(\theta) = 2\varepsilon_0\varepsilon E \cdot \cos\theta. \quad (4)$$

Вторая составляющая

$$E_\theta = -E \left(1 - \frac{R^2}{\rho^2}\right) \cdot \sin\theta \text{ – касательная.}$$

В однородном ЭП при $\rho=R$ она обращаются в нуль.

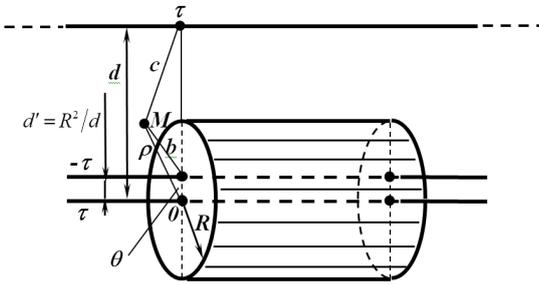


Рис. 2. Проводящий цилиндр в поле линейного заряда

Третья составляющая $E_z = 0$, входящая в выражение (3) тоже равна нулю.

Рассмотрим проводящий цилиндр в неоднородном ЭП линейного заряда.

Ось проводящего цилиндра разместим параллельно оси линейного заряда (рис. 2).

Вспользуемся обозначениями, принятыми на рис. 2. С учетом этих обозначений получим выражение для потенциала произвольной точки M вне цилиндра в зависимости от пространственных переменных ρ и θ [14]:

$$\varphi_M = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0} \ln \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\rho^2 - 2d'\rho \cos\alpha - d'^2}{\rho^2 - 2d\rho \cos\alpha + d^2}. \quad (5)$$

С учетом (5) и (3), радиальная составляющая напряжённости ЭП при $\rho=R$ будет иметь вид:

$$E_R = -\frac{1}{a} \cdot \left[1 - \frac{(1-a^2)}{(1-2a \cos\theta + a^2)}\right] E. \quad (6)$$

При этом, касательная составляющая вектора напряжённости неоднородного ЭП $E_\theta = \vec{e}_\theta \frac{1}{\rho} \frac{\partial\varphi}{\partial\theta}$ при $\rho=R$, обращаются в нуль.

Тогда поверхностная плотность электрического заряда на проводящем цилиндре при-

мет вид

$$\sigma = \sigma(\theta) = -\varepsilon_0\varepsilon \frac{1}{a} \cdot \left[1 - \frac{(1-a^2)}{(1-2a \cos\theta + a^2)}\right] E, \quad (7)$$

где в выражениях (4) и (7): ε_0 – электрическая постоянная, численно равная $\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды; $a=R/d$ – параметр, характеризующий степень неоднородности поля и определяющий пространственный диапазон измерения; R – радиус цилиндра; d – расстояние между осью цилиндра и линейным зарядом; θ – угол между координатной осью x и положением точки на боковой поверхности цилиндра; $E = \tau/2\pi\varepsilon_0 d$ – напряжённость поля линейного заряда с поверхностной плотностью τ в точке с координатами $\rho=0, \theta=0, z=0$.

Таким образом, получены выражения (4) и (7) для плотностей электрического заряда на цилиндрической поверхности датчика в однородном и неоднородном поле. Их можно использовать для дальнейших исследований цилиндрических датчиков напряженности ЭП.

Датчик напряженности электрического поля

Цилиндрический датчик напряженности ЭП (в дальнейшем – датчик) представлен на рис. 3.

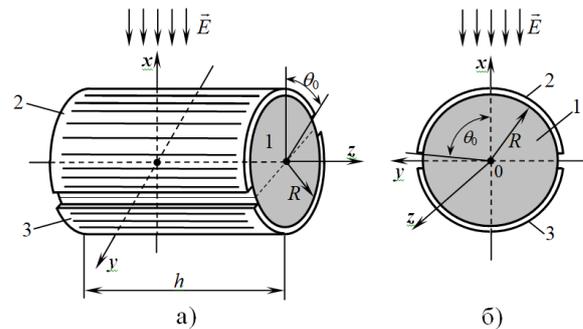


Рис. 3. Датчик напряженности электрического поля цилиндрической формы

Основой датчика является проводящий цилиндр 1. Геометрические размеры цилиндра задаются радиусом R и высотой h . В однородном поле поверхность цилиндра плоскостью электрической нейтралы условно разделяется на две равные части, представляющие собой полуцилиндры. В поле на одном полуцилиндре индуцируются положительные заряды, а на другом – отрицательные. Эти заряды пропорциональны напряженности ЭП. Снять элек-

трические заряды с поверхности условно выделенных полуцилиндров не представляется возможным. Одним из решений, позволяющим снять эти заряды, является наложение на цилиндрическое основание датчика двух реальных проводящих полуцилиндров, радиус R и высота h которых совпадают с размерами основания цилиндра, а их толщина много меньше радиуса R . Изолированно наложенные на основание проводящего цилиндра полуцилиндрические поверхности будут являться чувствительными элементами 2 и 3 датчика. Чувствительные элементы должны стать частью цилиндрической поверхности. Для этого необходимо выполнить условия:

1) чувствительные элементы должны быть нанесены на поверхность основания проводящего цилиндра тонким слоем из проводящего материала толщиной порядка $10 \div 100$ мкм;

2) толщина изоляционного слоя, отделяющего чувствительные элементы от основания цилиндрической поверхности должна быть того же порядка, что и толщина чувствительных элементов, а сам изоляционный слой нанесен на поверхность цилиндрического основания методами нано технологий.

При выполнении этих условий чувствительные элементы и основание проводящего цилиндра будут иметь одинаковый потенциал. В связи с этим и условиями, приведенными выше датчик можно считать единой проводящей цилиндрической поверхностью.

Размеры чувствительных элементов, ограничены радиусом R , высотой h цилиндра и угловым размером θ_0 (см. рис.3). Угловым размером θ_0 может варьироваться, и для полуцилиндра будет составлять $\theta_0=90^\circ$.

Таким образом, сформирован цилиндрический датчик направленного приема. Датчик состоит из проводящего цилиндрического основания 1 и двух, диаметрально противоположных полуцилиндрических чувствительных элементов 2 и 3. Каждый чувствительный элемент относительно проводящего цилиндрического основания образует одинарный датчик. Одновременное использование в процессе одного измерения двух одинарных датчиков в дифференциальном включении, позволяет сформировать двойной датчик.

Взаимосвязь электрического заряда с геометрическими параметрами датчика

Рассмотрим взаимодействие датчика с однородным полем свободного пространства и неоднородным полем линейного заряда и установим взаимосвязи между индуцированными электрическими зарядами, параметрами поля и датчика.

В однородном поле электрические заряды на чувствительных элементах 2 и 3 датчика будем определять, воспользовавшись выражением (1). При этом элемент цилиндрической поверхности, выраженный в полярной системе координат, примем равным

$$dS = R \cdot d\theta \cdot dz, \quad (8)$$

где R – радиус чувствительного элемента; θ – угол полярной системы координат; dz – элемент оси z совпадающей с осью симметрии цилиндра и изменяющийся от θ до h ; h – высота цилиндра, а поверхностную плотность заряда представим выражением (4).

Тогда, электрические заряды на поверхностях чувствительных элементах 2 и 3 (см. рис. 3), будут равны

$$q_2^{\text{одн.}}(t) = +4\varepsilon\varepsilon_0 R \cdot h \cdot \sin \theta_0 \cdot E(t); \quad (9)$$

$$q_3^{\text{одн.}}(t) = -4\varepsilon\varepsilon_0 R \cdot h \cdot \sin \theta_0 \cdot E(t); \quad (10)$$

где $E(t) = E_m \cos \omega t$; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; f – частота изменения ЭП.

Установлена взаимосвязь между электрическими зарядами чувствительных элементов 2, 3 датчика, конструктивными параметрами (R , h и θ_0) его составных частей, параметрами поля (ε , ε_0) и напряженностью однородного ЭП $E(t)$.

Суммарный выходной электрический заряд двойного датчика определится как

$$q_{\text{диф.}}^{\text{одн.}}(t) = (+q_2^{\text{одн.}}) - (-q_3^{\text{одн.}}) = 8\varepsilon\varepsilon_0 R \cdot h \cdot \sin \theta_0 \cdot E_x(t). \quad (11)$$

Таким образом, величина выходного заряда двойного датчика удвоится.

Электрический заряд с датчика снимают путем интегрирования выходного тока

$$i = \frac{dq_{\text{диф.}}^{\text{одн.}}(t)}{dt} = 8\varepsilon\varepsilon_0 \omega R \cdot h \cdot \sin \theta_0 \cdot E_x(t). \quad (12)$$

Из выражения (12) следует причина нецелесообразности использования электрического тока в качестве выходного сигнала датчика. Эта причина заключается в том, что выходной ток датчика пропорционален частоте поля ω , которая изменяется в реальных полях и будет приводить к дополнительной погрешности.

Таким образом, интегрируя выходной электрический ток (12) с помощью интегратора тока, можно определять напряжение, пропорциональное электрическому заряду, а, следовательно, и напряженности ЭП.

Рассмотрим неоднородное поле линейного электрического заряда с плотностью заряда, на единицу длины равной τ . Внесем в это поле цилиндрический датчик и определим электрические заряды, индуцированные на чувствительных элементах 2 и 3 датчика.

$$q_2^{\text{неод.}}(t) = \int_0^h \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \varepsilon \varepsilon_0 \frac{1}{a} \left[1 - \frac{(1-a^2)}{(1-2a \cos \theta + a^2)} \right] E(t) \cdot R \cdot d\theta \cdot dz = \quad (13)$$

$$= 4\varepsilon \varepsilon_0 R \cdot h \cdot \left\{ \frac{1}{2a} \left[\theta_0 - 2 \arctan \left(\frac{1+a}{1-a} \tan \frac{\theta_0}{2} \right) \right] \right\} E(t);$$

$$q_3^{\text{неод.}}(t) = - \int_0^h \int_{\pi-\theta_0}^{\pi-\theta_0} \varepsilon \varepsilon_0 \frac{1}{a} \left[1 - \frac{(1-a^2)}{(1-2a \cos \theta + a^2)} \right] E(t) \cdot R \cdot d\theta \cdot dz = \quad (14)$$

$$= -4\varepsilon \varepsilon_0 R \cdot h \cdot \left\{ -\frac{1}{2a} \left[\theta_0 - 2 \arctan \left(\frac{1-a}{1+a} \tan \frac{\theta_0}{2} \right) \right] \right\} E(t).$$

Установлена взаимосвязь между электрическими зарядами чувствительных элементов 2, 3 датчика, конструктивными параметрами (R , h и θ_0) его составных частей, параметрами поля (ε , ε_0) и напряженностью неоднородного ЭП $E(t)$. Параметр поля $a=R/d$ (R – радиус цилиндрического датчика, d – расстояние от оси цилиндрического основания датчика до линейного заряда), характеризует степень неоднородности поля. Параметр a также позволяет определить пространственный диапазон измерения датчика. Заряды, определяемые выражениями (13) и (14) пропорциональны вектору напряженности неоднородного ЭП $E(t)$. Зависимость электрических зарядов (13) и (14) от степени неоднородности поля a приводит к дополнительной погрешности датчика.

Суммарный выходной электрический заряд двойного датчика определится как

$$q_{\text{диф.}}^{\text{неод.}} = (+q_2^{\text{неод.}}) - (-q_3^{\text{неод.}}) = 8\varepsilon \varepsilon_0 R \cdot h \cdot \cos \theta_0 \times \left\{ \frac{1}{2a \cdot \cos \theta_0} \cdot \left[\arctan \left(\frac{1+a}{1-a} \tan \frac{\theta_0}{2} \right) - \left[-\arctan \left(\frac{1-a}{1+a} \tan \frac{\theta_0}{2} \right) \right] \right] \right\} E(t). \quad (15)$$

Таким образом, дифференциальный заряд позволяет определить напряженность неоднородного ЭП $E(t)$ в пределах погрешности от неоднородности поля.

Метрологические характеристики датчика

В качестве метрологических характеристик датчика рассмотрим чувствительность G и дополнительную погрешность δ , вызванную неоднородностью поля.

Воспользовавшись выражением (12) определим чувствительность двойного датчика в однородном поле

$$G_{\text{диф.}}^{\text{одн.}} = \frac{dq_{\text{диф.}}^{\text{одн.}}}{dE} = 8\varepsilon \varepsilon_0 R \cdot h \cdot \sin \theta_0. \quad (16)$$

Выражение (16) показывает, что при постоянстве параметров датчика R , h и θ_0 чувствительность датчика в однородном поле будет постоянной.

Аналогично, из выражения (15) найдем чувствительность двойного датчика в неоднородном поле линейного заряда

$$G_{\text{диф.}}^{\text{неодн.}} = \frac{dq_{\text{диф.}}^{\text{неодн.}}}{dE} = 8\varepsilon \varepsilon_0 R \cdot h \cdot \sin \theta_0 \times \left\{ \frac{1}{2a \cdot \sin \theta_0} \cdot \left[\arctan \left(\frac{1+a}{1-a} \tan \frac{\theta_0}{2} \right) - \left[-\arctan \left(\frac{1-a}{1+a} \tan \frac{\theta_0}{2} \right) \right] \right] \right\}. \quad (17)$$

Выражения (17) показывает не постоянство чувствительности датчика в неоднородном поле, поскольку в выражение для чувствительности входит относительное расстояние до источника поля $a=R/d$, характеризующее степень его неоднородности. Отсюда возникает дополнительная погрешность датчика, вызванная неоднородностью поля.

Проведем оценку минимально возможной напряженности ЭП, которую может еще воспринимать датчик. Она будет определяться входным пороговым током интегратора тока. Воспользовавшись выражением (12), находим

$$E_{\min}(t) = \frac{i_{\text{порог.}}(t)}{8\epsilon\epsilon_0\omega Rh \sin \theta_0}, \quad (18)$$

где $i_{\text{порог.}}(t) = (0,5 \div 2,0)$ пА - пороговое значение интегратора тока [15].

Из выражения (18) следует, что $E_{\min}(t)$ зависит от конструктивных параметров датчика и его частоты. Чем больше эти параметры, тем меньше будет $E_{\min}(t)$. Если принять $R=2 \cdot 10^{-2}$ м, $h=5 \cdot 10^{-2}$ м, $\theta_0=58^\circ$ и $f=50$ Гц, то $E_{\min}(t) \approx (25 \div 100)$ мВ/м.

Сравнения выражения (16) и (17) оценим относительную погрешность датчика от неоднородности поля по известной формуле

$$\delta(a) = \frac{G_{\text{диф.}}^{\text{неод.}} - G_{\text{диф.}}^{\text{одн.}}}{G_{\text{диф.}}} \times 100 = \left[\frac{\left[\arctan\left(\frac{1+a}{1-a} \tan \frac{\theta_0}{2}\right) - \arctan\left(\frac{1-a}{1+a} \tan \frac{\theta_0}{2}\right) \right]}{2a \cdot \sin \theta_0} - 1 \right] \times 100. \quad (19)$$

Определим оптимальные угловые размеры чувствительных элементов датчика, для которых минимуму погрешности δ соответствует максимально возможный пространственный диапазон измерения a . Для этого найдем экстремумы выражения (19).

В математическом редакторе MathCAD по выражению (19) рассчитаем и построим два графика. Графики, представляющие зависимости $a=f(\delta)$ и $\theta_0=f(\delta)$ приведены на рис. 4, а, б соответственно.

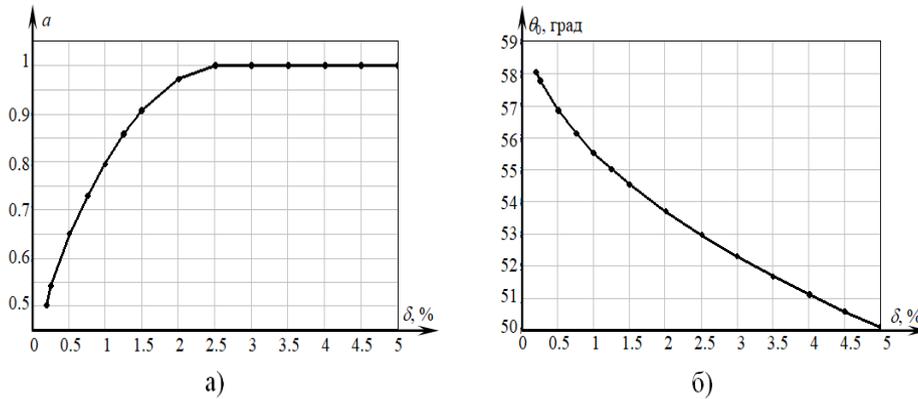


Рис. 4. Графики зависимости: а) пространственного диапазона измерения a и б) углового размера чувствительного элемента θ_0 от погрешности δ , вызванной неоднородностью поля

Из графиков рис. 4. следует, что в максимально возможном пространственном диапазоне измерения ($0 \leq a < 1$) погрешность δ не выходит за пределы $\pm 2,5\%$. В этом диапазоне погрешностей угловые размеры θ_0 чувствительных элементов датчика могут выбираться из диапазона $50^\circ < \theta_0 < 53^\circ$. При этом каждому выбранному угловому значению θ_0 будет соответствовать своя предельная погрешность. Эта погрешность по модулю не будет превышать $\pm 2,5\%$. В реальных условиях превысить предел пространственного диапазона измерений $a=0,5$ не безопасно. Значение $a=0,5$ ограничивает приближение датчика к источнику поля на расстояние, не превышающее радиус R цилиндрического основания датчика. Поэтому, приемлемым пространственным диапазоном измерения следует считать диапазон $0 \leq a \leq 0,5$. В этом пространственном диапазоне измерения погрешность датчика не превысит $\pm 0,2\%$.

При этом угловые размеры θ_0 чувствительных элементов могут выбираться из диапазона $58^\circ \leq \theta_0 \leq 90^\circ$. Максимальной погрешности $\pm 0,2\%$ и максимальному пространственному диапазону измерения $a \leq 0,5$ будет соответствовать минимальный угловой размер чувствительных элементов, равный $\theta_0=58^\circ$.

При необходимости использования датчика на расстояниях до источника поля меньших его радиуса, т.е. в диапазоне $0,5 < a < 1$ минимально возможная погрешность может достигать $\pm 2,5\%$.

Результаты исследований

Проведены теоретические исследования цилиндрического датчика напряженности ЭП направленного действия в однородном поле свободного пространства и неоднородном поле линейного заряда. Рассмотрено взаимодей-

ствие датчика с указанными полями, в результате которого установлена взаимосвязь между измеряемой напряженностью ЭП и конструктивными параметрами датчика. Сделана оценка чувствительности датчика и его погрешности. Установлены их зависимости от пространственного диапазона измерений a . Полученные результаты легли в основу разработки исследуемого датчика с требуемыми метрологическими характеристиками [16].

Заключение

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1) предложена в упрощённом виде конструкция электроиндукционного цилиндрического датчика напряженности ЭП направленного действия. Датчик состоит из проводящего цилиндра радиуса R и высотой h и двух цилиндрических чувствительных элементов, конструктивные параметры которых задаются угловыми θ_0 и линейными R и h размерами;

2) определены плотности электрических зарядов на проводящей поверхности цилиндра, созданные однородным полем свободного пространства и неоднородным полем линейного заряда;

3) установлена взаимосвязь электрических зарядов, индуцированных на чувствительных элементах датчика, с напряженностью ЭП;

4) получены выражения для чувствительности датчика и проведена её оценка. По оценке чувствительность датчика составляет $\sim (25 \div 100)$ мВ/м;

5) проведена оценка погрешности датчика, показывающая возможность его использования:

а) в свободном пространстве, ограниченным пространственным диапазоном $0 < a \leq 0.5$ ($d=2R$) с погрешностью $\pm 0,2\%$. Для этого необходимо выполнить чувствительные элементы датчика с размером, равным $\theta_0 = 58^\circ$;

б) вблизи источника поля, ограниченным пространственным диапазоном $a < 1$ ($d < 2R$) с погрешностью $\pm 2,5\%$. Для этого необходимо выполнить чувствительные элементы датчика с размером, равным $\theta_0 = 53^\circ$.

В заключении можно отметить, что предложенный датчик позволит создавать приборы для измерения напряженности ЭП с высокими метрологическими характеристиками.

Литература

1. Влияние ВЛ на линии радиовещания, связи. URL: <https://leg.co.ua/info/vl/vliyanie-vl-na-linii-radioveschaniya-svyazi.html>
2. ГОСТ Р 51070-97. Измерители напряженности электрического и магнитного полей. Общие технические требования и методы испытаний: утвержден и введен в действие постановлением Госстандарта России от 3 июля 1997 г. № 239. М.: Госстандарт, 1998. 17 с.
3. Щигловский, К.Б., Аксельрод, В.С. Приборы для измерения параметров электростатического поля и их калибровка // Измерительная техника. 1978. № 5. С. 63–65.
4. Kolmogorova S.S., Baranov D.S., Tyukin A.V. Electric field strength sensor of cylindrical form // IOP Conf.Series: Journal of Physics: Conf. Series 944, conf. 1. (2017) 012017. P. 8. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012017.
5. Патент на полезную модель № 183095 РФ, МПК G 01 R 29/12 / С.В. Бирюков, А.И. Блесман. – № 2018120984; Заявл. 06.06.2018; Оpubл. 11.09.2018, Бюл. № 26.
6. Misakian M., Kotter F.R., Kahler R.L. Miniature ELF Electric Field Probe // Instruments for scientific research. 1978. Vol 49 (7). P. 933–935. DOI: 10.1063/1.1135497.
7. A Power-Frequency Electric Field Sensor for Portable Measurement / D. Xiao, Q. Ma, Y. Yutong Xie [et al.] // Sensors (Basel). 2018. Vol. 18 (4). 1053. DOI: 10.3390/s18041053.
8. Щапова Л.В. Датчик напряженности электрического поля в виде плоской проводящей пластины в форме квадрата // Омский научный вестник. 2017. № 5 (155). С. 126–130.
9. Biryukov S.V., Korolyova M.A. Electroinduction disk sensor of electric field strength // IOP Conf.Series: Journal of Physics: Conf. Series 944, conf. 1. (2017) 012017/ P. 8. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012017.
10. Берент Г.Н., Плейс И.П. Датчик электрического поля // Приборы для научных исследований. 1971. № 6. С. 141–142.
11. Гатман С. Двойной измеритель электрического поля с защитой // Приборы для научных исследований. 1968. № 1. С. 45–49.
12. Baicry M., Le Prado M. Device for measuring an electric field in a conducting medium and method of calibrating such a device. US patent 0238646A1; filed February 17th, 2016; published August 18th, 2016.
13. Pittman E.P., Stanford R.A. Electric field sensor. US patent no. 3,641,427; filed September 24th, 1969; published February 08th, 1972.
14. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле. 7-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1978. 273 с.
15. Алексенко А.Г., Коломбет Е.А., Стародуб Г.И. Применение прецизионных аналоговых ИС. М.: Сов. радио, 1980. 224 с.
16. Патент № 181781. РФ. МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / С. В. Бирюков, А. С. Колмогорова, С. С. Колмогорова. – заявитель и патентообладатель Омский государственный технический университет. – № 2018115125; заявл. 23.04.2018; опубл. 26.07.2018, Бюл № 21.

Бирюков Сергей Владимирович – д-р техн. наук, профессор кафедры физики, Омский государственный технический университет (644050, Россия, г. Омск, пр-т Мира, д. 11), e-mail: sbiryukov154@mail.ru, тел. +79081066078, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1362-9911>

INVESTIGATION OF ELECTRIC INDUCTION SENSOR OF ELECTROMAGNETIC FIELD STRENGTH CYLINDRICAL DIRECTIONAL RECEPTION

S.V. Biryukov

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Abstract: the paper considers the interaction of an electro-inductive cylindrical sensor of the intensity of the electric component of the electromagnetic field of directional reception with a homogeneous field of free space and an inhomogeneous field of linear charge. The relationship between the measured electric field strength, the charges induced on the sensor's sensitive elements and the structural parameters of the sensor are established. The results obtained formed the basis for the development of a directional EF voltage sensor with the required metrological characteristics. The sensor consists of a conductive cylinder of radius R and height h and two cylindrical sensing elements, the design parameters of which are set by angular θ_0 and linear R and h dimensions. Expressions of sensitivity of the sensor and its error due to the non-uniformity of the field are given, and their evaluation is carried out. The evaluation shows the possibility of using the sensor, both in free space and near the field source. In free space, limited by the spatial range of measurement $0 < a \leq 0.5$ ($d = 2R$) at $\theta_0 = 58^\circ$, the error from the inhomogeneity of the sensor field will be no more than $\pm 0.2\%$. Near the source of the field, limited by the spatial range $a < 1$ ($d < 2R$) at $\theta_0 = 53^\circ$ the sensor error will be no more than $\pm 2.5\%$. The sensor sensitivity is $(25 \div 100)$ mV/m

Key words: strength, field, electromagnetic, electric, electric field sensor, cylindrical sensor, directional reception sensor, sensitivity, error

References

1. "Influence of overhead lines on broadcasting and communication lines" ("Vliyaniye VL na linii radioveshchaniya i svyazi"), available at: <https://leg.co.ua/info/vl/vliyanie-vl-na-linii-radioveshchaniya-svyazi.html>.
2. GOST R 51070-97, "Electric and magnetic field strength meters. General technical requirements and test methods" ("Izmeriteli napryazhennosti elektricheskogo i magnitnogo poley. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya i metody ispytaniy").
3. Shchiglovsky K.B., Akselrod V.S. "Devices for measuring the parameters of the electrostatic field and their calibration", *Measuring technology (Izmeritel'naya tekhnika)*, 1978, no 5, pp. 63-65.
4. Kolmogorova S.S., Baranov D.S., Tyukin A.V. "Electric field strength sensor of cylindrical form", *IOP Conf., Journal of Physics, Conf. Series 944, conf. 1, 2017, 012017*, p. 8. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012017.
5. Biryukov S.V., Blesman A.I. "Electric field strength sensor", Utility model patent №183095 RF, MPK G 01 R 29/12, № 2018120984, publ.11.09.2018.
6. Misakian M., Kotter F.R., Kahler R.L. "Miniature ELF Electric Field Probe", *Instruments for scientific research*, 1978, vol. 49 (7), pp. 933-935. DOI: 10.1063/1.1135497.
7. Xiao, D., Ma Q., Yutong Xie Y. [et al.]. "A Power-Frequency Electric Field Sensor for Portable Measurement", *Sensors (Basel)*, 2018, vol. 18 (4), p. 1053. DOI: 10.3390/s18041053.
8. Shchapova L.V. "Sensor of electric field strength in the form of a flat conductive plate in the form of a square", *Omsk Scientific Bulletin (Omskiy nauchnyy vestnik)*, 2017, no. 5 (155), pp. 126-130.
9. Biryukov S.V., Korolyova M.A. "Electroinduction disk sensor of electric field strength", *IOP Conf., Journal of Physics, Conf. Series 944, conf. 1, 2017, 012017*, p. 8. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012017.
10. Berent G.N., Place I.R. "Electric field sensor", *Instruments for scientific research (Pribory dlya nauchnykh issledovaniy)*, 1971, no. 6, pp. 141-142.
11. Gatman S. "Double electric field meter with protection", *Instruments for scientific research (Pribory dlya nauchnykh issledovaniy)*, 1968, no 1, pp. 45-49.
12. Baicry, M., Le Prado M. "Device for measuring an electric field in a conducting medium and method of calibrating such a device", US patent 0238646A1, filed February 17, 2016, publ. August 18, 2016.
13. Pittman E.P., Stanford R.A. "Electric field sensor", US patent no. 3,641,427, filed September 24, 1969, publ. February 08, 1972.
14. Bessonov L.A. "Theoretical foundations of electrical engineering: Electromagnetic field" ("Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: Elektromagnitnoe pole"), Moscow: Vysshaya shkola, 1978, 273 p.
15. Aleksenko A.G. "Application of precision analog ICs" ("Primeneniye pretsizionnykh analogovykh IS"), Moscow: Sov. radio, 1980, 224 p.
16. Biryukov S.V., Kolmogorova S.S., Kolmogorov A.S. "Electric field strength sensor" ("Datchik napryazhennosti elektricheskogo polya"), Utility model patent №181781 RF, MPK G 01 R 29/12, №2018115125, publ. 26.07.2018.

Submitted 13.02.2023; revised 18.04.2023

Information about the authors

Sergey V. Biryukov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Omsk State Technical University (11 Mira prospect, Omsk 644050, Russia), e-mail: sbiryukov154@mail.ru, tel.: +79081066078, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1362-9911>

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПОТЕРЬ В МАГНИТНЫХ ОБМОТКАХ Понижающего Преобразователя

А.В. Башкиров, Я.В. Скитский, Н.Ю. Веретенников

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлены этапы проведения эксперимента по определению потерь в обмотках магнитных компонентов импульсных источников питания. Данные потери обусловлены протеканием токов высокой частоты: эффектом близости и скин-эффектом. С этой целью производится расчет потерь, вызванных перемагничиванием в силовом дросселе преобразователя, а также измеряется мощность, рассеиваемая в результате статических и динамических потерь на основном транзисторе и транзисторе активного выпрямления понижающего преобразователя. С целью повышения точности проводимого эксперимента, а также сходимости итоговых результатов применяется несколько вариантов расчета потерь в магнитопроводе силового дросселя. Для этого используется несколько видов уравнения Штейнметца, а именно – обобщенный и модифицированный. Второй вариант необходим, чтобы учесть отличие закона изменения вектора магнитной индукции от синусоидального. В ходе эксперимента были получены фактические значения рассеиваемой в тепло мощности для всех основных узлов силового контура понижающего преобразователя. Описанная в статье методика проведения эксперимента может быть использована для верификации и сравнения различных методов численного и аналитического моделирования тепловых потерь в обмотках точных изделий, а также на силовых транзисторах и диодах схемы

Ключевые слова: высокочастотные потери, эффект близости, скин-эффект, потери в феррите, уравнение Штейнметца, потери на транзисторах, рассеиваемая мощность, измерение потерь в магнитном компоненте

Введение

В современных источниках питания одними из ключевых характеристик являются их КПД и массо-габаритные размеры. При этом, наиболее остро становится вопрос оптимизации потерь в силовых транзисторах и магнитном компоненте изделия. Зачастую, аналитические расчеты, также как и итоги моделирования дают лишь приблизительный результат различной степени точности. В связи с этим, становится актуальной задача измерения потерь в каждом конкретном узле силового каскада преобразователя. Потери в понижающем DC/DC преобразователе по месту их возникновения можно разделить на несколько частей [1]:

а) потери на обеспечение функционирования управляющей части:

- ШИМ-контроллер
- MOSFET-драйверы;

б) потери на транзисторах:

- статические
- динамические;

в) потери в магнитном компоненте:

- потери в обмотке;
- потери в сердечнике;

г) прочие потери:

- потери в проводниках схемы;
- потери в конденсаторах.

Существует несколько подходов к решению задач, связанных с анализом потерь в магнитном компоненте. Посредством метода конечных элементов (МКЭ) возможно получить данные высокой точности, однако это требует дополнительных затрат, например, создание двухмерной или трехмерной модели, что затрудняет процесс оптимизации.

Помимо МКЭ применяется ряд аналитических методов, таких как метод Дуэла и его производные, но они не применимы для точных изделий с чередующимися обмотками. Как наименее поддающиеся аналитическому расчету, наиболее интересными для измерения являются высокочастотные потери в обмотках магнитного компонента преобразователя [2, 3].

Для нахождения потерь в обмотке магнитного компонента, необходимо из всей мощности, рассеиваемой в изделии, вычесть все источники потерь, кроме искомого. Потери в емкостях входного и выходного фильтра, а также на проводниках схемы в данном эксперименте можно не учитывать, поскольку они являются пренебрежимо малыми по сравнению с остальными потерями и частично компенсируются методикой проведения эксперимента. Для того чтобы не учитывать потери на

обеспечение функционирования управляющей части, для формирования сигнала необходимо использовать внешний генератор, а питание драйверов силовых ключей осуществлять от внешнего источника.

Нахождение суммарных потерь

Для нахождения суммарных потерь была собрана экспериментальная установка (рис. 1), основанная на понижающем DC/DC преобразователе. Его схема изображена на рис. 2.

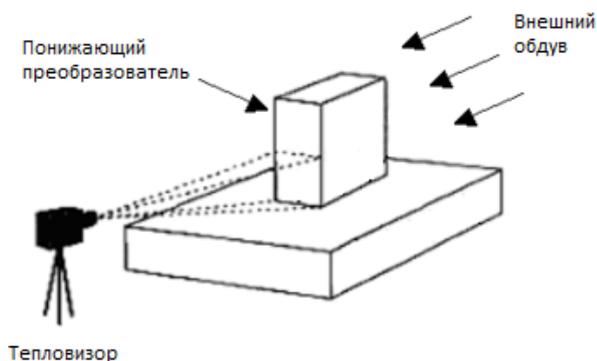


Рис. 1. Схема испытательной установки

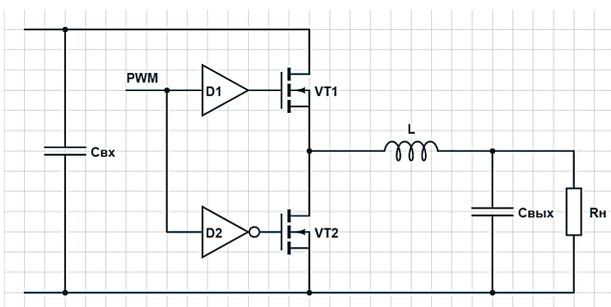


Рис. 2. Силовая часть испытательного стенда

В качестве основного транзистора (VT1), а так же транзистора синхронного выпрямления (VT2) применялись транзисторы n-типа IRFB4127PbF. С целью обеспечения необходимого режима работы ключей была использована микросхема LM5112 (D1, D2) и генератор сигналов специальной формы GW Instek MFG-72110. Прочие исходные параметры данного преобразователя представлены в табл. 1.

После запуска понижающего DC/DC преобразователя был произведен анализ его рабочего режима. Для этого были измерены осциллограммы напряжения сток-исток на основном транзисторе, и формы тока, протекающего через дроссель. Полученные формы сигнала представлены на рис. 3.

Таблица 1

Параметры преобразователя		
Параметр	Значение	Ед.
Входное напряжение	48	В
Выходное напряжение	24	В
Выходной ток	3	А
Выходная мощность	72	Вт
Частота преобразования	1	МГц



Рис. 3. Осциллограммы тока в дросселе (1) и напряжения сток-исток верхнего ключа (2)

После получения необходимых осциллограмм были произведены измерения для нахождения коэффициента полезного действия и определения суммарных потерь в преобразователе (табл. 2).

Таблица 2

КПД преобразователя		
Параметр	Значение	Ед.
Входное напряжение	48,04	В
Входной ток	1,5809	А
Выходное напряжение	24,04	В
Выходной ток	3,0146	А
КПД	95,42	%
Суммарные потери	3,475	Вт

Потери на транзисторах

Для измерения потерь в силовых транзисторах необходимо измерить и зафиксировать температуру обоих ключей в установившемся режиме. Полученные температуры для верхнего и нижнего транзистора представлены на рис. 4 (а и б, соответственно). Данные изображения получены путем проведения наблюде-

ния посредством тепловизора, закреплённого на штативе с целью минимизации искажений при проведении измерений

Для нахождения потерь на каждом из транзисторов необходимо найти мощность, при рассеивании которой его корпус будет нагреваться до той же температуры, что и в установившемся рабочем режиме при тех же условиях. Температура окружающей среды должна оставаться неизменной.



Рис. 4. Значение температуры верхнего (а) и нижнего (б) транзистора в рабочем режиме

Для достижения этого результата затвор одного из транзисторов смещается в положительную область относительно своего истока на напряжение, необходимое для полного открытия канала. Через открытый канал транзистора пропускается постоянный ток до достижения тех же значений установившейся температуры на корпусе транзистора, что и при нормальной работе преобразователя (рис. 4). Так как прикладываемое к транзистору напряжение и протекающий через него постоянные, то можно легко посчитать рассеиваемую мощность. Если температура окружающей среды в течение эксперимента не изменялась, то эта мощность будет равна рассеиваемой на транзисторе мощности в рабочем режиме. Значения измеренной мощности для двух транзисторов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Рассеиваемая мощность				
Компонент	T, °C	U, мВ	I, А	P, Вт
Верхний ключ	110	198,63	3,74	0,74
Нижний ключ	65,7	385,25	5,75	2,22

С целью минимизации искажений результатов эксперимента, измерение падения напряжения на открытом канале полевого транзистора производилось при помощи дополнительных сигнальных проводников, закреплённых на выводах ключа, что в значительной степени повысило итоговый параметр схожести.

Чтобы исключить влияние внешних факторов измерения проводились при фиксированной температуре окружающей среды, а также с одинаковой скоростью потока воздуха, охлаждающего преобразователь. Значения температур на верхнем и нижнем транзисторе при снятии параметров, приведенных в табл. 1, представлены на рис. 5 (а и б, соответственно).

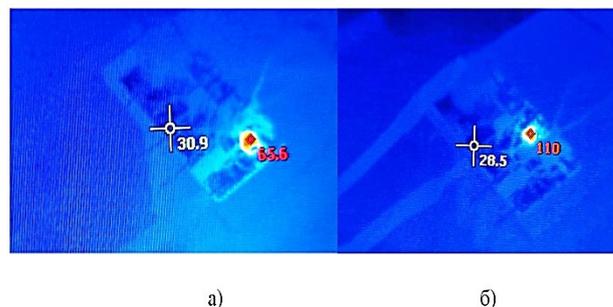


Рис. 5. Значение температуры верхнего (а) и нижнего (б) транзистора при пропускании постоянного тока

Потери в магнитопроводе

Потери в магнитном компоненте преобразователя складываются из потерь в сердечнике и потерь в обмотке. Потери в сердечнике можно рассчитать, используя уравнение Штейнметца [4].

$$P_v = C_m \cdot f^x \cdot B_{max}^y \cdot C_T, \quad (1)$$

где P_v — рассеиваемая мощность на единицу объема;

f — рабочая частота преобразования;

B_{max} — максимальная индукция;

x, y, C_m, C_T — эмпирические коэффициенты.

Коэффициенты уравнения x, y, C_m, C_T определяются для каждого материала отдельно и обычно предоставляются производителем. Для материала 3F36 коэффициенты представлены в табл. 4.

Таблица 4

Коэффициенты для материала

Материал	Коэффициенты			
	$C_m, 10^{-9}$	X	Y	$C_T, 10^{-6}$
3F36	224,928	2,61	2,4 9	863,06

Поскольку коэффициенты в уравнении (1) определяются для токов синусоидальной формы, то для нашего случая в чистом виде оно не применимо. Так как потери в сердечнике возникают вследствие изменения индукции магнитного поля B , то вместо B_{max} в формулу необходимо подставить $\Delta B/2$. Постоянная составляющая магнитной индукции B не участвует в формировании потерь напрямую. С другой стороны, она определяет рабочую точку магнитного компонента, а следовательно, должна быть учтена при проведении эксперимента. Для повышения точности расчетов при проектировании дросселя был выбран линейный участок BH -характеристики сердечника [5].

Исходя из документации на применяемый сердечник, а также описанных выше условий, был произведен расчет потерь в феррите. Расчетные потери составили 292 мВт.

В качестве альтернативного метода расчета потерь в сердечнике магнитного компонента может быть использовано модифицированное уравнение Штейнметца (2).

$$P_v = C_m \cdot f_{eq}^X \cdot B_{max}^Y \cdot C_T \quad (2)$$

$$f_{eq} = \frac{2}{\Delta B^2 \pi^2} \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt$$

Данное уравнение позволяет находить потери при несинусоидальной форме изменения вектора магнитной индукции. Так как эмпирический параметр частоты заменяется физическим параметром скорости изменения индукции [6]. В литературе показано, что частота изменения поля f и скорость изменения индукции $\left(\frac{dB}{dt}\right)$ могут быть сопоставлены между собой через нормализующую константу. С применением модифицированного уравнения Штейнметца расчетные потери в магнитопроводе составили 208 мВт.

Заключение

Результатом данного эксперимента стало нахождение потерь в обмотках магнитного компонента понижающего преобразователя (табл. 5.) В таблице представлены результаты измерений потерь в транзисторах, а также рассеиваемая мощность в сердечнике и обмотке. Как итог – потери в обмотке реактора понижающего преобразователя в данном режиме работы составляют 0,254 Вт при использовании обобщенного уравнения Штейнметца и 0,3382 Вт при использовании модифицированного уравнения Штейнметца.

Таблица 5

Результаты эксперимента

Метод расчета потерь в сердечнике		OSE	MSE
Суммарные потери в преобразователе, Вт		3,475	3,475
Потери в ключах, Вт	Верхний ключ	0,744	0,744
	Нижний ключ	2,218	2,218
Потери в сердечнике, Вт		0,292	0,208
Потери в обмотке, Вт		0,2544	0,3382

Описанная в статье методика проведения эксперимента может быть использована для верификации и сравнения различных методов численного и аналитического моделирования потерь в обмотках точных изделий.

Полученные результаты измерений могут быть использованы для оценки эффективности магнитного компонента, как отдельного узла силовой схемы.

Литература

1. Герасимов А.А., Кастров М.Ю. Электромагнитные компоненты преобразователей напряжения // Практическая силовая электроника. 2001. № 1. С. 28-32.
2. Матвеев К. Использование пакета Ansys для моделирования электромагнитных элементов импульсных преобразователей // Силовая электроника. 2004. № 2. С. 92.
3. Ridley R. Circuit modeling of winding loss for inductors and transformers. URL: https://www.pdma.com/sites/default/files/uploads/files/Magnetics%20Workshop%202017/Ridley_Spice%20Models%20For%20Conductor%20Losses.pdf
4. 3F36 Material Specification. URL: <https://ferroxcu.be.home.pl/prod/assets/3f36.pdf>
5. Reinert J., Brockmeyer A., De Doncker R.W. Cal-

ulation of losses in ferro- and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation. Industry Applications //

IEEE Transactions on. 37. 1055 - 1061. 10.1109/28.936396 2001.

Поступила 13.03.2023; принята к публикации 17.04.2023

Информация об авторах

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

Скитский Ярослав Витальевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: nauchrab@mail.ru

Веретенников Николай Юрьевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: Veretennikoff.nik@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6746-2371>

MEASUREMENT OF HIGH-FREQUENCY LOSSES IN THE MAGNETIC WINDINGS OF A BUCK CONVERTER

A.V. Bashkirov, Ya.V. Skitsky, N.Yu. Veretennikov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the stages of the experiment to determine the losses in the windings of the magnetic components of switching power supplies are presented. These losses are due to the flow of high-frequency currents: the proximity effect and the skin effect. For this purpose, the losses caused by magnetization reversal in the power inductor of the converter are calculated, as well as the power dissipated as a result of static and dynamic losses on the main transistor and the active rectification transistor of the buck converter is measured. In order to improve the accuracy of the experiment, as well as the convergence of the final results, several options for calculating losses in the magnetic circuit of the power inductor are used. For this, several types of the Steinmetz equation are used, namely, generalized and modified. The second option is necessary to take into account the difference between the law of change of the magnetic induction vector and the sinusoidal one. During the experiment, the actual values of the power dissipated into heat were obtained for all the main nodes of the power circuit of the step-down converter. The experimental technique described in the article can be used to verify and compare various methods of numerical and analytical modeling of heat losses in the windings of winding products, as well as on power transistors and circuit diodes

Key words: high frequency loss, proximity effect, skin effect, ferrite loss, Steinmetz's equation, transistor loss, power dissipation, loss measurement in magnetic components

References

1. Gerasimov A.A., Kastrov M.Yu. "Electromagnetic components of voltage converters", *Practical power electronics (Prakticheskaya silovaya elektronika)*, 2001, no. 1, pp. 28-32.
2. Matveev K. "Using the Ansys package for modeling electromagnetic elements of pulse converters", *Power electronics (Silovaya elektronika)*, 2004. no. 2, pp. 92.
3. Ridley R. "Circuit modeling of winding loss for inductors and transformers", available at: https://www.psm.com/sites/default/files/uploads/files/Magnetics%20Workshop%202017/Ridley_Spice%20Models%20For%20Conductor%20Losses.pdf
4. Kazimierczuk M.K. "High-Frequency Magnetic Components", John Wiley & Sons Ltd, 2009, 508 p.
5. "3F36 Material Specification", available at: <https://ferroxcube.home.pl/prod/assets/3f36.pdf>
6. Reinert J., Brockmeyer A., De Doncker R.W. "Calculation of losses in ferro- and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation. Industry Applications", IEEE Transactions on. 37. 1055 - 1061. 10.1109/28.936396, 2001.

Submitted 13.03.2023; revised 17.04.2023

Information about the authors

Aleksey V. Bashkirov, Dr. of Sc. (Technical), Head of the Department of Design and Production of Radio Equipment, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru

Yaroslav V. Skitsky, Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: nauchrab@mail.ru

Nikolay Yu. Veretennikov, Postgraduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: Veretennikoff.nik@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6746-2371>

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОИСТЫХ ПАНЕЛЕЙ
ДЛЯ ГОРЯЧЕЙ ЧАСТИ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ****В.И. Федосеев¹, М.В. Молод², В.И. Максименков²**¹**Филиал ПАО «Корпорация «Иркут», г. Воронеж, Россия**²**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: рассмотрены вопросы изготовления слоистых панелей, применяемых для снижения шума турбореактивного двигателя. Приведены однослойные и двухслойные конструкции, применяемые в кожухах шумоглушения двигателей. Разработан технологический процесс изготовления слоистых панелей, определяющий этапы получения плоской панели и панели заданной криволинейной формы. Процесс изготовления осуществляется с нагревом в вакуумных печах. Осуществляя формообразование слоистых панелей, выявлены браковочные признаки: пружинение панели, разрыв верхнего несущего слоя, потеря устойчивости внутреннего слоя панели, смятие сотового наполнителя. Для проводимых исследований были выбраны материалы сотовых панелей – стальные и титановые сплавы. Проведенные испытания на растяжение образцов на испытательной машине «Р-10» в холодном состоянии и с нагревом заготовки с записью диаграмм « σ - ϵ » позволили определить предельные возможности материала, необходимые для разработки технологического процесса. Проведен расчёт параметров формообразования панели. Представлена новая конструкция штампа, в котором при формообразовании осуществляется предварительное и последующее растяжение панели. Степень растяжения регулируется углом наклона применяемых клиньев с учетом предельных возможностей материала панели. Проведены исследования, которые позволили сравнить результаты полученных панелей при базовом варианте и при растяжении панели. Эксперименты выявили отсутствие браковочных признаков, кроме перечисленных выше и в виде искажении граней ячеек наполнителя, оказывающих влияние на ресурс слоистых панелей

Ключевые слова: слоистые конструкции, формообразование, нагрев, штамп, деформации

Введение

В конструкциях современных летательных аппаратах особая роль отводится решению вопросов снижения уровня шума двигателя, так как акустические характеристики – один из основных показателей, определяющих его конкурентоспособность.

Задачи шумоглушения в турбореактивном двигателе решаются применением звукопоглощающих конструкций (ЗПК). Наиболее широкое применение нашли однослойные и двухслойные панели (рис. 1), состоящие из несущих слоев – перфорированной и сплошной обшивок и наполнителя – сотового наполнителя.

Для горячей части двигателя панели изготавливаются из титановых сплавов и нержавеющей сталей.

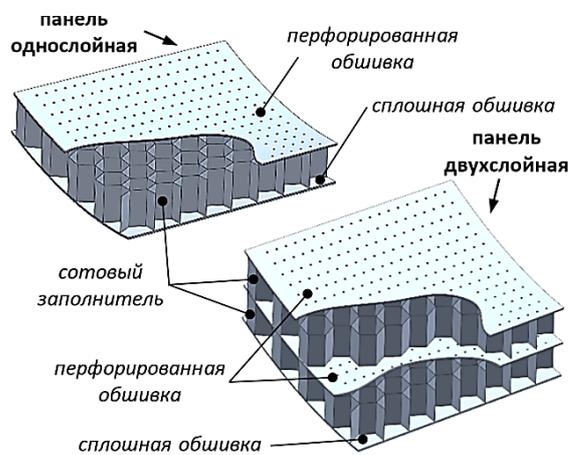


Рис. 1. Звукопоглощающие конструкции

Процесс деформирования плоской ЗПК на заданный радиус кривизны является основной технологической операцией изготовления панелей шумоглушения [1, 2]. Формообразование осуществляется в штампах (рис. 2) с нагревом в вакуумной печи (УВН) следующим образом: заготовку панели 7 устанавливают на матрицу 1; сверху на панель устанавливают пуансон 2; рычаги 3 с грузами 4 перемещаются в рабочее положение до касания упоров 5 пуансона 2.

Постановка задачи

Цель работы: разработать конструкцию штампа, исключая появление браковочных признаков. Провести исследования по оценке качества получаемых панелей.

Штамп для формообразования с нагревом в печи УВН с растяжением

Разработанная конструкция штампа обеспечивает повышение точности панели (рис. 4), что достигается посредством того, что узел регулирования давления на пуансон снабжен средством одновременного растяжения панели, выполненном в виде клинового соединения, подвижно соединенного с рычагами.

Процесс формообразования панели, описанный выше, сопровождается ее растяжением с помощью клиньев 8.

Применение растяжения в процессе формообразования панели позволяет обеспечить растяжение внутренней и наружной обшивок и соединенных с ними ячеек сотового заполнителя. При этом грани ячеек остаются прямолинейными, то есть не теряют своей геометрической формы, что обеспечивает требуемое качество получаемой панели.

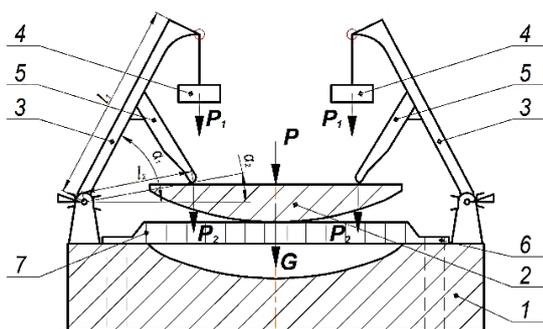


Рис. 2. Схема штампа для формообразования: 1 - матрица; 2 - пуансон; 3 - рычаг; 4 - груз; 5 - нажимной рычаг; 6 - направляющие; 7 - панель

Штамп помещают в печь и нагревают. При высокой температуре предел текучести материалов резко снижается. Под действием нагрузки, приложенной к панели, начинается процесс ее деформации, который продолжается до полного прилегания к матрице.

При формообразовании панелей возможно появление браковочных признаков (рис. 3).

Основными браковочными признаками являются:

- разрыв наружного слоя;
- потеря устойчивости/ складкообразование/внутреннего слоя;
- смятие сотового заполнителя;
- пружинение панели;
- седловидность панели.

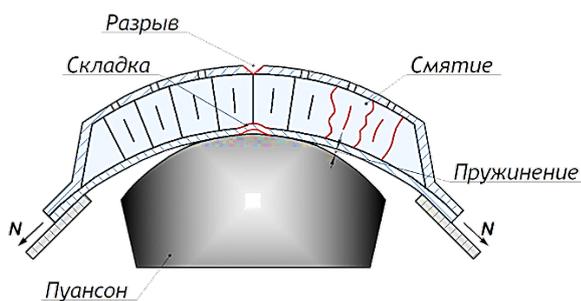


Рис. 3. Браковочные признаки

Кроме того, в процессе применения существующего оборудования выявлено, что при деформировании сотовой панели двойной кривизны невозможно обеспечить заданную величину предварительного растяжения, что оказывает влияние на точность изготовления панели.

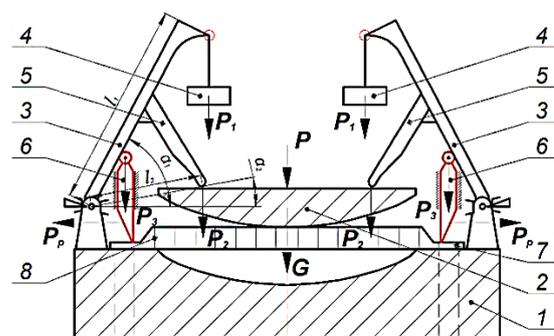


Рис. 4. Схема разработанного штампа: 1 - матрица; 2 - пуансон; 3 - рычаг; 4 - груз; 5 - нажимной рычаг; 6 - клинья; 7 - направляющие; 8 - панель

Проведенные исследования подтвердили решение поставленной задачи [3,4].

Рассмотрены деформации ячеек заполнителя.

Формообразование без растяжения панели показано на рис. 5. Размеры ячеек заполнителя на наружной стороне панели, контактирующей с заполнителем, растягиваются (рис. 5, б), а на внутренней – сжимаются (рис. 5, а). При этом грани ячеек теряют прямолинейную форму.

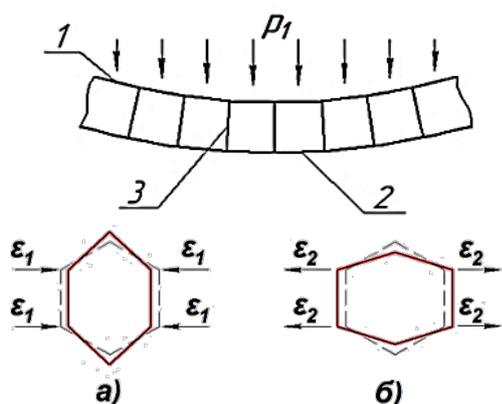


Рис. 5. Схема искажения ячеек заполнителя без растяжения: 1 - внутренняя обшивка; 2 - внешняя обшивка; 3 - стенка ячейки заполнителя

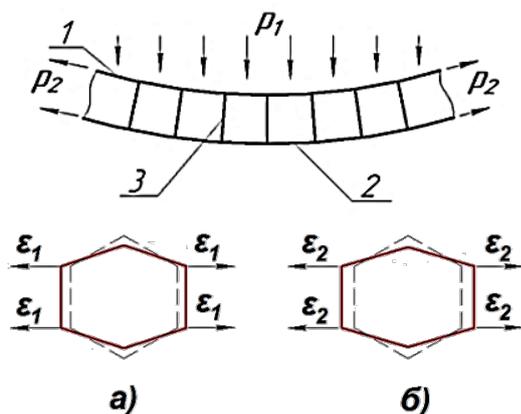


Рис. 6. Схема искажения ячеек заполнителя с растяжением: 1 - внутренняя обшивка; 2 - внешняя обшивка; 3 - стенка ячейки заполнителя

Применение растяжения панели (рис. 6) исключает процесс искажения граней ячейки

Сравнивая характер деформаций заполнителя следует, что в первом случае возникающие деформации на внутренней ячейки и внешней имеют различные знаки (сжатие и растяжение), что ведет к искажению граней ячейки, вследствие этого снижается устойчивость панели и ее ресурс.

Применение растяжения обеспечивает деформации одного знака, что исключает искажение граней ячейки и достаточно для получения качественной панели, при этом происходит снижение ее пружинения, увеличение ресурсных характеристик [1].

Технологический процесс изготовления панели

Схема технологического процесса изготовления слоистой панели с нагревом приведена на рис. 7.

Выбор материала заготовки, указанный в схеме технологического процесса, требует проведения механических испытаний образцов в холодном состоянии и с нагревом для определения предельных возможностей слоистых панелей, которые являются критерием выбора технологии изготовления слоистой панели. Полученные результаты испытаний представлены в табл. 1 [3].

Таблица 1

Механические характеристики образцов

Материал	Температура $t, ^\circ\text{C}$	Предел прочности $\sigma_b, \text{МПа}$	Относительное удлинение $\delta, \%$
12Х18Н10Т	20	650	19,5
	700	265	34
ОТ4-1	20	670	23
	760	100	40

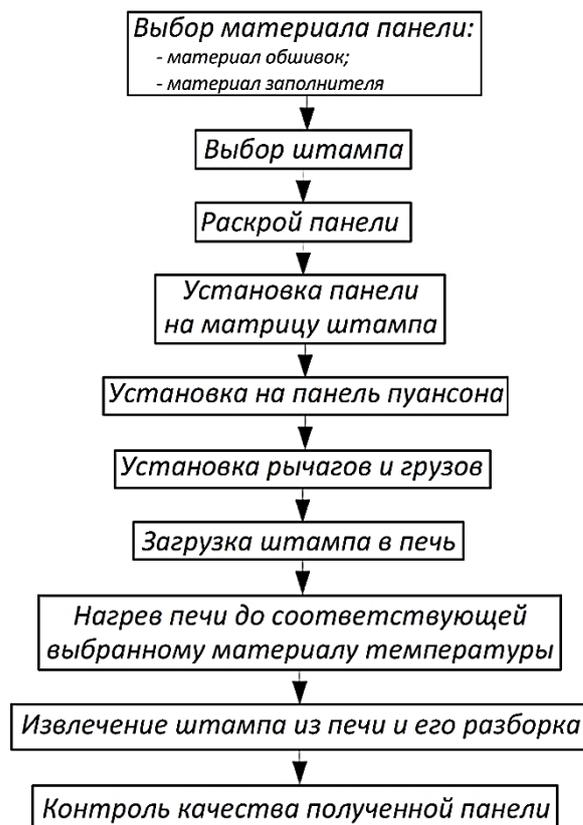


Рис. 7. Схема технологического процесса изготовления слоистой панели

Расчет параметров формообразования панели

Усилие формообразования определяется по зависимостям (1) и (2) [4]:

$$P = P_2 + G, \quad (1)$$

$$P_2 = \frac{P_1 \cdot l_1 \cdot \cos \alpha_1}{l_2 \cdot \cos \alpha_2}, \quad (2)$$

где P_2 - регулируемое усилие деформирования;
 G - масса пуансона;
 P_1 - усилие от веса груза;
 l_1 - расстояние от центра вращения нажимного рычага до тяги;
 l_2 - расстояние от нажимного рычага до точки касания рычага.

Усилие растяжения панели в процессе формообразования панели зависит от угла наклона клина (рис.8) и определяется по зависимости (3):

$$P_p = \frac{P_3}{\cos \alpha} \cdot \cos \gamma, \quad (3)$$

где α – угол клина, град.;
 γ – угол между плоскостью клина и горизонтальной плоскостью, град;
 P_3 – вертикальное усилие клина, кгс.

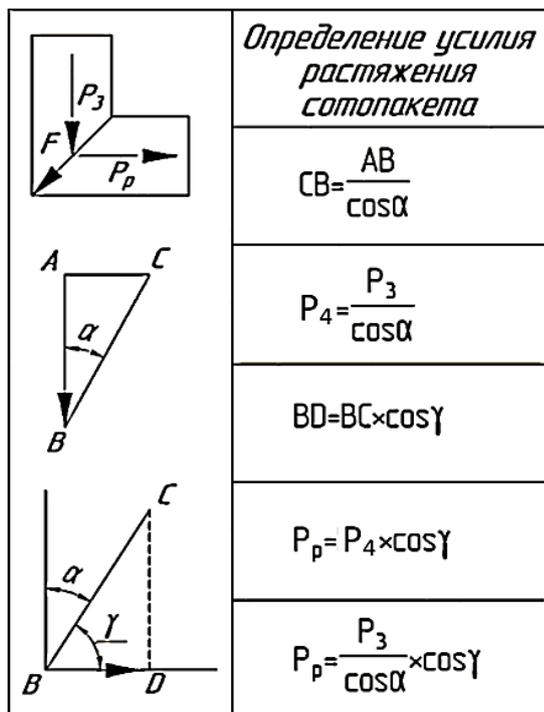


Рис. 8. Расчет усилия растяжения в зависимости от угла клина

Проведенные испытания панелей с нагревом в штампе подтвердили повышение качества получаемых деталей. Технологический процесс реализован при изготовлении кожухов шумоглушения горячей части турбореактивного двигателя.

Заключение

1. Проведенный анализ конструкции штампов по формообразованию панелей ЗПК позволил разработать новую конструкцию, в которой исключаются появление браковочных признаков при формообразовании.

2. Технология изготовления слоистых панелей определяет этапы получения плоской панели и заданной криволинейной формы, обеспечивая требуемую точность изделия.

3. Выполнены расчеты определения усилия формообразования панели ЗПК при предварительном растяжении и изгибе панели, исключающие искажение граней ячейки заполнителя.

4. Внедрение штампа для формообразования панелей ЗПК для горячей части ТРД позволяет повысить качество получаемых деталей для изготовления кожухов шумоглушения.

Литература

1. Горбунов М.Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. 351 с.
2. Максименков В.И., Одинг С.С. Термодеформирование сотовых панелей с электроконтактным нагревом // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 12. С. 89-91.
3. Максименков В.И., Молод М.В., Федосеев В.И. Формообразующие технологии для изготовления кожухов шумоглушения турбореактивного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т.17. № 3. С. 167-174.
4. Пат. 2 707 024 Российская Федерация, МПК В32В 3/12. Штампы для формообразования панелей / В.И. Максименков, М.В. Молод, В.И. Федосеев; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет». № 2019104810; заявл. 20.02.2019; опубл. 21.11.2019, Бюл. №33. 8 с.

Информация об авторах

Федосеев Владислав Игоревич – ведущий инженер-конструктор, филиал ПАО «Корпорация «Иркут» (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, 27), e-mail: vladislav.f@inbox.ru

Молод Марина Владиславовна - д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: molodmv@yandex.ru

Максименков Владимир Иванович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: maksimenkov.v.i@mail.ru

STUDY OF THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING NOISE REDUCTION HONEYCOMB PANELS FOR THE HOT PART OF A TURBOJET ENGINE

V.I. Fedoseev¹, M.V. Molod², V.I. Maksimenkov²

¹Branch of Corporation «Irkut», Voronezh, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses the issues of manufacturing honeycomb panels used to reduce engine noise. The designs of single-layer and double-layer panels made of steel and titanium alloys are given. The shaping of these panels is carried out in dies in vacuum furnaces. The developed stamp designs do not exclude the appearance of defective signs. The developed design of the stamp allows the formation of a layered panel with stretching, which eliminates distortion of the cell faces. The scheme of the technological process of forming panels is given, including the materials used with an assessment of the ultimate deformations at different temperatures, the geometric parameters of the panels obtained, the kinematics of the stamp and the forming process. Tests with heating were carried out on a universal breaking machine with a record of the diagrams "σ-ε". The calculation of the shaping parameters with the estimation of the shaping effort is performed. At the same time, the tensile force of the panel during shaping is determined with an assessment of the limiting capabilities of the material determined during the tensile testing of samples. On the received panels, an increase in their quality was noted, which is necessary for the subsequent manufacture of the turbofan muffler casing

Key words: layered structures, shaping, heating, stamp, deformation

References

1. Gorbunov M.N. "Technology of procurement and stamping works in the production of aircraft" ("Technologia zagotovitelno-shtampovochnykh rabot v proizvodstve letatelnykh apparatov"), Moscow: Mashinostroyeniye, 1970, 351 p.
2. Maksimenkov V.I., Oding S.S. "Thermodeforming of honeycomb panels with electric contact heating", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 12, pp.89-91.
3. Maksimenkov V.I., Molod M.V., Fedoseev V.I. "Forming technologies for the manufacture of turbojet engine noise reduction casings", *The Bulletin of Samara University. Aerospace engineering, technology and mechanical engineering (Vestnik Samar-skogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye)*, 2018, vol.17, no. 3. pp. 167-174.
4. Maksimenkov V.I., Molod M.V., Fedoseev V.I. "Stamp for forming panels" ("Shtamp dlya formoobrazovaniya peneley"), Patent of RF 2 707 024, IPC B32B 3/12, cop. holder Voronezh State Technical University, no 2019104810; application 20.02.2019, publ. 21.11.2019, Bul. no. 33, 8 p.

Submitted 05.03.2023; revised 20.04.2023

Information about the authors

Vladislav I. Fedoseev, Chief Designer, Branch of Corporation «Irkut», (27 Tsiolkovskogo str., Voronezh 394029, Russia), e-mail: vladislav.f@inbox.ru.

Marina V. Molod, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Aircraft Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), E-mail: molodmv@yandex.ru

Vladimir I. Maksimenkov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Department of Aircraft Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: maksimenkov.v.i@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВОЙ СИЛЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.В. Куц¹, В.С. Кочергин¹, О.Н. Кириллов², М.В. Якин¹

¹Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: работа посвящена исследованию осевой силы и температуры в зоне резания при протягивании с повышенными величинами подъема на зуб ($0,2 \leq S_z \leq 0,5$ мм/зуб) на основе компьютерного моделирования процесса резания в программе Deform 3D. Моделирование выполнялось для конструкционных сталей: 45; 40X и 12ХН3А в соответствии с трехуровневым трехфакторным планом проведения эксперимента, где варьирование факторов осуществлялось в диапазонах: для переднего угла от 5 до 15 градусов; для скорости резания от 2 до 12 м/мин и подъема на зуб от 0,2 до 0,5 мм/зуб. С применением программы Statistica были установлены зависимости для осевой силы резания, осевой силы резания, приходящейся на 1 мм длины режущей кромки, удельной осевой силы резания и температуры в зоне резания с учетом обрабатываемого материала, скорости резания, переднего угла и величины подъема на зуб. Показаны данные, подтверждающие адекватность полученных уравнений регрессии. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, полученными другими исследователями, установлено их совпадение, что позволяет их использовать при проектировании протяжек с повышенными подачами до 0,5 мм

Ключевые слова: протягивание, подача на зуб, протяжка, сила резания, температура в зоне резания

Введение

Протягивание, широко применяющееся в крупносерийном и массовом производстве, в настоящее время, является одним из наиболее производительных видов обработки [1], что связано с отсутствием движения подачи и возможностью обработки заготовки за один цикл главного движения. Однако установившиеся в практике проектировании протяжек рекомендации по использованию малых величин подъема на зуб ($S_z < 0,2$ мм/зуб) [1-5], являются основным препятствием для повышения производительности и эффективности процесса протягивания [6, 7].

Постановка задачи

Разработка конструкций протяжек, работающих с повышенными величинами подъема на зуб ($0,2 \leq S_z \leq 0,5$ мм/зуб), требует детального исследования контактных процессов протекающих при протягивании различных конструкционных материалов, в частности установлению зависимостей для осевой силы и температуры в зоне резания, что связано с большими временными и материальными затратами на проведение натурных экспериментов. В связи с

чем, в работе использовался метод компьютерного моделирования процесса протягивания.

Методы выполнения исследования

В рамках исследования выполнялось моделирование процесса резания одним зубом (рис. 1) при протягивании шпоночного паза шириной 10 мм в заготовках из материалов: сталь 45; сталь 40X и 12ХН3А. Моделирование выполнялось в программе Deform 3D.

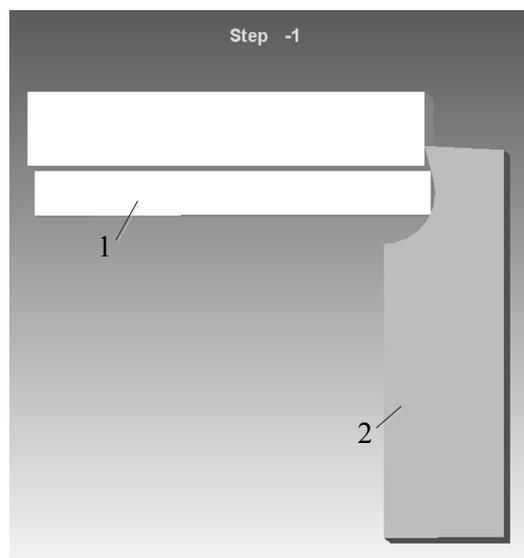


Рис. 1. Установка зуба шпоночной протяжки относительно заготовки в Deform 3D

Таблица 1

Характеристики проведения эксперимента

Уровень	$\gamma, ^\circ$	$v, \text{ м/мин}$	$S_z, \text{ мм/зуб}$
Нижний	5	2	0,2
Основной	10	7	0,35
Верхний	15	12	0,5

При моделировании (рис. 1) зуб протяжки (2) устанавливался со смещением в вертикальном направлении относительно поверхности заготовки (1) на величину подъема на зуб.

Для каждого обрабатываемого материала выполнялось моделирование процесса резания, и режимы обработки варьировались в соответствии с принятыми характеристиками планирования (табл. 1).

В табл. 1 приняты следующие обозначения: γ - передний угол зуба протяжки; v - скорость резания; S_z - подъем на зуб.

После моделирования, для каждой точки плана эксперимента определялись, величина силы в направлении перемещения инструмента и наибольшей температуры в зоне резания (рис. 2).



Рис. 2. Результаты моделирования температуры в зоне резания шпоночной протяжкой в Deform 3D

На рис. 2 показан результат моделирования процесса протягивания стали 45, на скорости 12 м/мин и подаче на зуб равном 0,2 мм, где при данных режимах обработки наибольшая температура не превышает 385 °С и зона наибольших температур расположена в месте контакта передней поверхности со стружкой вблизи вершины режущей кромки.

Обработка результатов моделирования

По результатам моделирования процесса резания каждого обрабатываемого материала были составлены обобщенные таблицы, где, по аналогии с другими исследователями в рассматриваемой области [1-3], для характеристики обрабатываемого материала использовалось

значение его твердости по Бринеллю (НВ). Для построения уравнения регрессии осевой силы было выполнено логарифмирование исходных данных и с применением программы Statistica получено следующее уравнение

$$\ln(P) = 13,311 - 0,609 \ln(HB) - 0,168 \ln(\gamma) - 0,041 \ln(v) + 0,813 \ln(S_z), \quad (1)$$

где HB - твердость обрабатываемого материала по Бренеллю.

Исходя из рассчитанных характеристик построенного уравнения (рис. 3), где вероятность ошибки первого рода близка нулю, был сделан вывод о его адекватности.

Зависим. Перемен.	SS модели и SS остатков (Таблица данных1)										
	Множест. R	Множест. R2	Скоррект R2	SS Модель	сс Модель	MS Модель	SS Остаток	сс Остаток	MS Остаток	F	p
P	0,984188	0,968626	0,968616	2208,904	4	552,2259	71,54802	13142	0,005444	101433,3	0,00

Рис. 3. Характеристики уравнения регрессии для осевой силы

Проведя экспонирование уравнения (1) было получено окончательное уравнение для осевой силы при протягивании шпоночного паза шириной 10 мм для рассматриваемых конструкционных сталей

$$P = \frac{604232,055S_z^{0,812}}{HB^{0,609}\gamma^{0,167}v^{0,041}}, \text{ Н.} \quad (2)$$

Разделив уравнение (2) на ширину обрабатываемого паза (10 мм), было получено уравнение для силы резания, приходящееся на единицу длины режущей кромки шпоночной протяжки

$$p_B = \frac{60423,206S_z^{0,812}}{HB^{0,609}\gamma^{0,167}v^{0,041}}, \text{ Н/мм,} \quad (3)$$

а разделив уравнение (3) на величину подачи на зуб уравнение для удельной силы резания

$$p_s = \frac{60423,206}{HB^{0,609}\gamma^{0,167}v^{0,041}S_z^{0,188}}, \text{ Н/мм}^2. \quad (4)$$

На рис. 4 показан график изменения удельной осевой силы для разных марок кон-

струкционных сталей от скорости резания при $\gamma = 5^\circ$ и $S_z = 0,2$ мм/зуб.

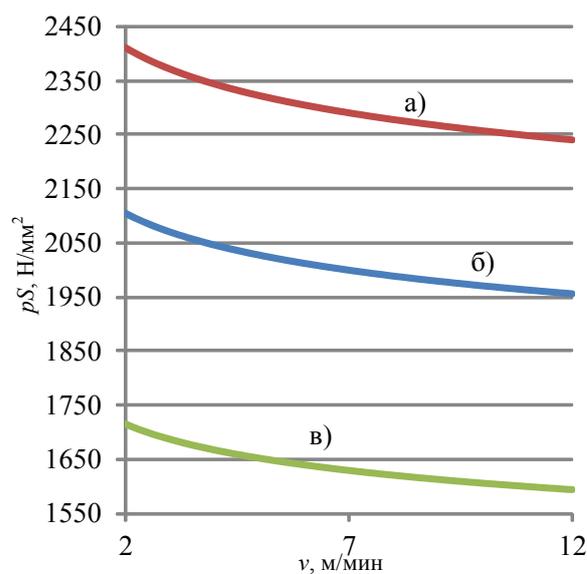


Рис. 4. График изменения удельной осевой силы при протягивании стали: а) 45; б) 40Х; в) 12ХНЗА

Также, на основе результатов моделирования процесса резания, с выполнением линеаризации исходных данных, было построено уравнение регрессии для температуры в зоне резания в программе Statistica (рис. 5).

Зависим. Перемен.	SS модели и SS остатков (Таблица данных1)										
	Множест. R	Множест. R2	Скоррект R2	SS Модель	сс Модель	MS Модель	SS Остаток	сс Остаток	MS Остаток	F	p
T	0,892755	0,797012	0,796897	608,2811	4	152,0703	154,9205	7024	0,022056	6894,771	0,00

Рис. 5. Характеристики уравнения регрессии для температуры в зоне резания

$$\ln(\Theta) = 5,058 + 0,191\ln(HB) - 0,313\ln(\gamma) + 0,293\ln(v) + 0,329\ln(S_z). \quad (5)$$

Так как вероятность ошибки первого рода близка нулю, то можно сделать вывод об адекватности полученного регрессионного уравнения.

Проведя экспоненциальное преобразование уравнения (5) было получено окончательное уравнение для температуры в зоне резания

при протягивании шпоночного паза шириной 10 мм

$$\Theta = \frac{157,279HB^{0,191}v^{0,293}S_z^{0,329}}{\gamma^{0,314}}, \text{ }^\circ\text{C.} \quad (6)$$

На рис. 6 показан график изменения температуры при протягивании стали 45 при $S_z=0,2$ мм/зуб для протяжки с различными передними углами режущей кромки шпоночной протяжки, из которого следует, что с увеличе-

нием переднего угла температура в зоне резания уменьшается на всем диапазоне рабочих скоростей резания.

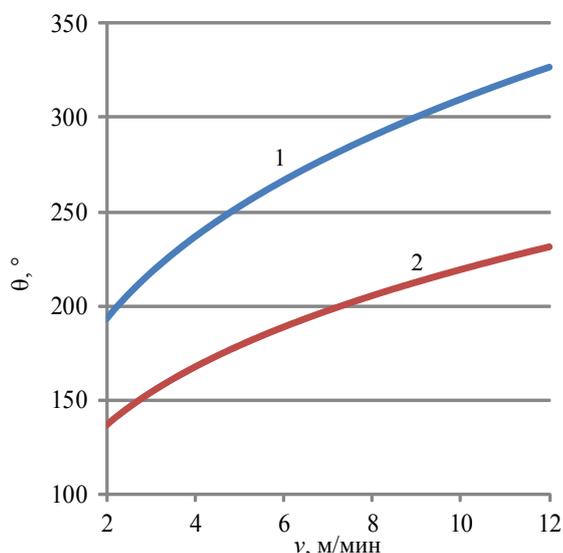
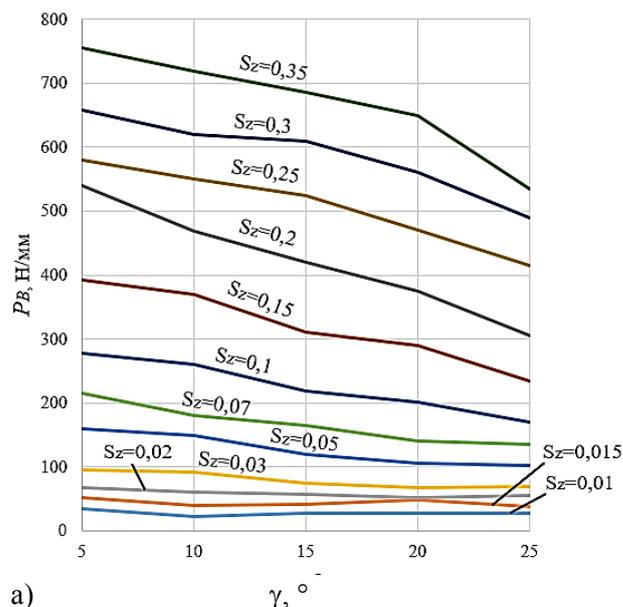


Рис. 6. График изменения температуры в зоне резания при протягивании стали 45:
1) $\gamma=5^\circ$; 2) $\gamma=15^\circ$

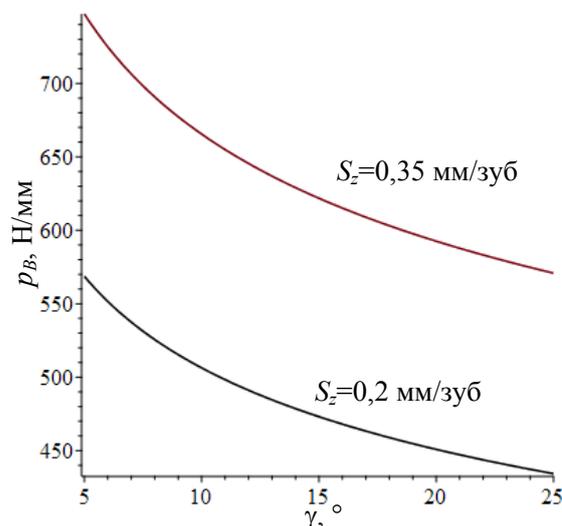
На основе полученных уравнений был проведен сравнительный анализ изменения силы резания, приходящейся на 1 мм длины режущей кромки при протягивании стали 45 (рис. 7) при скорости резания 3 м/мин и заднем угле равном 3° .

По графикам, представленным в работе [1] (рис. 7, а) и по графикам (рис. 7, б), построенным на основании полученного уравнения (3), при подъеме на зуб 0,2 мм наилучшее схождение результатов наблюдается при переднем угле до 10° и расхождение результатов не превышает 5,3 %. На верхней границе переднего угла, в рамках построенного плана эксперимента (табл. 1), равном 15° расхождение достигает 13,5 %.

При подъеме на зуб 0,35 мм расхождение уже не превышает 7 % на всём диапазоне передних углов от 5 до 25° . Из всего сказанного можно сделать вывод о достаточно неплохой сходимости построенных в работе зависимостей удельной силы резания, приходящейся на 1 мм длины режущей кромки, от переднего угла и результатами экспериментов, представленными в работах других.



а)



б)

Рис. 7. Влияние переднего угла γ на силу резания, приходящуюся на 1 мм длины режущей кромки при разных подачах для стали 45 ($v=3$ м/мин, $\alpha=3^\circ$):
а) по данным [1]; б) по формуле (3)

Был проведен сравнительный анализ влияния толщины срезаемого слоя на силу резания, приходящейся на 1 мм длины режущей кромки, при протягивании стали 45 при $v=3$ м/мин, $\gamma=10^\circ$ и $\alpha=3^\circ$ (рис. 8) по графикам, представленным в работе [1] и по графикам, построенным на основании полученного уравнения (3).

На рис. 8, а, кривые 1-5 соответствуют данным из различных источников, которые были обобщены в работе [1], где при подаче на зуб 0,05 мм наблюдается размах значений в пределах 130 Н/мм, а при подъеме на зуб 0,35 мм размах составляет 440 Н/мм. С учетом того, что построенная на основе формулы (3) кривая (рис. 8, б) по значениям не выходит за

границы рассматриваемых кривых (рис. 8, а) можно сделать вывод о хорошей сходимости полученных результатов.

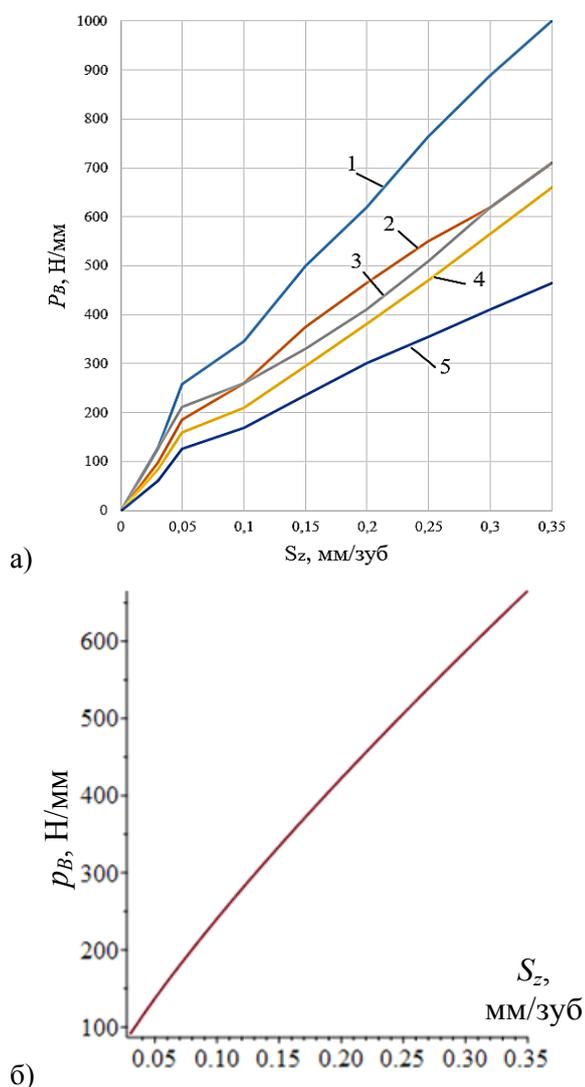


Рис. 8. Влияние толщины среза на силу резания, приходящейся на 1 мм длины режущей кромки, для стали 45: а) по данным [1]; б) по формуле (2)

Поступила 09.03.2023; принята к публикации 17.04.2023

Информация об авторах

Куц Вадим Васильевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305000, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), тел.: 8(4712)222669, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Кочергин Виталий Сергеевич – аспирант кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: koshergin@mail.ru

Кириллов Олег Николаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 8(473)2530973, e-mail: kirillov.ollli@yandex.ru

Якин Михаил Вячеславович – магистрант кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: jaysfoxt@gmail.com

Заключение

Анализ полученных графиков показывает хорошее совпадение построенных с помощью установленных зависимостей с известными экспериментальными данными по силам резания [1], что позволяет использовать данные зависимости при проектировании протяжек с повышенными подачами до 0,5 мм.

Литература

1. Протяжки для обработки отверстий / Маргулис Д.К., Тверской М.М., Ашихмин В.Н. и др. М.: Машиностроение, 1986. 232 с.
2. Промтов А.И., Зарак Т.В. Проектирование протяжек для обработки отверстий: монография. Иркутск: ИрГТУ, 2007. 176 с.
3. Макаров В.Ф. Оптимизация протягивания труднообрабатываемых материалов: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2014. 437 с.
4. Макаров В.Ф. Интенсификация процесса протягивания труднообрабатываемых материалов: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: СТАНКИН, 1998. 453 с.
5. Петухов Г.Д., Макаров В.Ф. Расчет режимов резания при проектировании протяжного инструмента и исследование влияния режимов резания и геометрии протяжек на стружкообразование // Вестник машиностроения. 2016. № 6. С. 73-76.
6. Горещкая З.Д. Протягивание с большими подачами. М.: Машгиз, 1960. 204 с.
7. Кочергин В.С., Куц В.В., Разумов М.С. Методика определения минимально допустимого и максимально возможного подъема на зуб при проектировании протяжек для обработки гранных отверстий со стороны более 60 мм // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 8. С. 376-379.

INVESTIGATION OF AXIAL FORCE AND TEMPERATURE IN THE CUTTING ZONE AT STRETCHING BASED ON COMPUTER SIMULATION

V.V. Kuts¹, V.S. Kochergin¹, O.N. Kirillov², M.V. Yakin¹

¹Southwest State University, Kursk, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the work is devoted to the study of axial force and temperature in the cutting zone during stretching with increased lifting values per tooth ($0,2 \leq S_z \leq 0,5$ mm/tooth) based on computer modeling of the cutting process in the Deform 3D program. Modeling was performed for structural steels: 45; 40X and 12KHN3A in accordance with a three-level three-factor plan of the experiment, where the factors were varied in the ranges: for the front angle from 5 to 15 degrees; for cutting speeds from 2 to 12 m/min and lifting per tooth from 0.2 to 0.5 mm /tooth. Using the Statistica program, dependencies were established for the axial cutting force, the axial cutting force of the cutting edge length per 1 mm, the specific axial cutting force and the temperature in the cutting zone, taking into account the material being processed, the cutting speed, the front angle and the amount of tooth lift. The data confirming the adequacy of the obtained regression equations are shown. The results obtained were compared with experimental data obtained by other researchers, their coincidence was established, which allows them to be used in the design of broaches with increased feed rates up to 0.5 mm

Keywords: stretching, feeding on the tooth, broaching, cutting force, temperature in the cutting zone

References

1. Margulis D.K., Tverskoy M.M., Ashikhmin V.N. et al. "Hole making broaches" ("Protyazhki dlya obrabotki otverstiy"), Moscow: Mashinostroenie, 1986, 232 p.
2. Promtov A.I., Zarak T.V. "Design of Hole making broaches" ("Proyektirovaniye protyazhek dlya obrabotki otverstiy", Irkutsk: IrGU, 2007, 176 p.
3. Makarov V.F. "Optimization of stretching of hard-to-process materials", ("Optimizatsiya protyagivaniya trudnoobrabatyvayemykh materialov"), Stary Oskol: TNT, 2014, 437 p.
4. Makarov V.F. "Intensification of the process of stretching hard-to-process materials" ("Intensifikatsiya protsessy protyagivaniya trudnoobrabatyvayemykh materialov"), Dr. of Tech. Sci. diss., Moscow: STANKIN, 1998.
5. Petukhov G.D., Makarov V.F. "Calculation of cutting modes in the design of a broaching tool and investigation of the influence of cutting modes and geometry of broaches on chip formation", *The Bulletin of Mechanical Engineering (Vestnik mashinostroyeniya)*, 2016, no. 6, pp. 73-76.
6. Goretskaya Z.D. "High feed broaching" ("Protyagivaniye s bol'shimi podachami"), Moscow: Mashgiz, 1960, 204 p.
7. Kochergin V.S., Kutz V.V., Razumov M.S. "Methodology for determining the minimum permissible and maximum possible lifting on the tooth when designing broaches for processing faceted holes with a side of more than 60 mm", *Assembly in mechanical engineering, instrumentation (Sbornik v mashinostroyenii, priborostroyenii)*, 2020, no. 8, pp. 376-379.

Submitted 09.03.2023; revised 17.04.2023

Information about the authors

Vadim V. Kuts, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Southwest State University (94 50 let Oktyabrya str., Kursk 305000, Russia), tel.: 8(4712)222669, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Vitaly S. Kochergin, Postgraduate student, Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Southwest State University (94 50 let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: koshergin@mail.ru

Oleg N. Kirillov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: 8(473)2530973, e-mail: kirillov.ollli@yandex.ru

Mikhail V. Yakin, Master's student, Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Southwest State University (94 50 let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: jaysfoxt@gmail.com

СЛОИСТАЯ ПАНЕЛЬ ДЛЯ КАНАЛА ВОЗДУХОЗАБОРНИКА САМОЛЕТА

В.И. Максименков¹, М.В. Молод¹, П.С. Огурцов²¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия²Филиал ПАО «ИЛ» - ВАСО, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрены вопросы проведения анализа применяемых сотовых панелей в каналах воздухозаборника самолетов. Приведены трехслойные сотовые панели, применяемые в конструкции пассажирских самолетов, соответствующих 4 главе Международного стандарта ИКАО (Конвекция о международной гражданской авиации). Поставлена задача повышения акустической эффективности слоистых панелей за счет создания новых конструкций. Приведена трехслойная конструкция, подтвержденная патентом, которая состоит из верхнего несущего слоя, выполненного из перфорированной обшивки и сеток С 685, и слоев сотового заполнителя, плотность которых меняется от верхнего слоя к нижнему в соотношении 1:2:3. Такая конструкция расширяет спектр частот, обеспечивая широкополосное поглощение шума. Выполнены расчеты плотности каждого слоя сотовой панели. Проведены прочностные расчеты образцов сотового заполнителя с различной плотностью. Полученные значения предела прочности на сжатие определяют выбор слоистой конструкции с учетом допустимых требований. Разработан технологический процесс изготовления трехслойной панели, позволяющий получать слоистые панели требуемого качества. Проведен весовой расчет, позволяющий определить, что разработанная конструкция практически снижает вес более чем в 1,5 раза по сравнению с базовым вариантом. Проведенные испытания выявили повышение акустической эффективности конструкции панели по сравнению с базовым вариантом

Ключевые слова: сотовая панель, плотность, технологический процесс, сетка, канал воздухозаборника

Введение

Постоянное ужесточение норм Международного стандарта ИКАО по снижению шума требует поиска новых конструктивно-технологических параметров звукопоглощающих конструкций для гражданских самолетов. В настоящее время применение в конструкции канала воздухозаборника самолета двух и трехслойных конструкций (рис. 1) направлено на решение поставленных задач. Эти конструкции имеют перфорированные несущие слои из алюминиевых сплавов Д16АМ толщиной 1,2 мм. Слои сотового заполнителя изготавливают из стеклопластика ССП. Эти конструкции канала воздухозаборника самолетов соответствуют 4 главе ИКАО. [2]

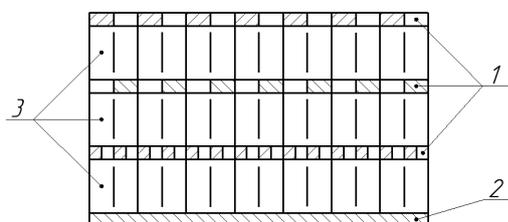


Рис. 1. Трехслойная сотовая конструкция панели канала воздухозаборника самолета: 1. Перфорированные обшивки верхнего и средних слоев; 2. Сплошная обшивка; 3. Сотовый заполнитель верхнего, среднего и нижнего слоев

Постановка задачи

Цель работы: разработать новую конструкцию слоистой панели, провести исследования по оценке параметров панели с сотовым заполнителем, обеспечивающей повышенную эффективность шумоглушения.

Разработка конструкции сотовой панели

Разработана сотовая панель рис. 2. [3]

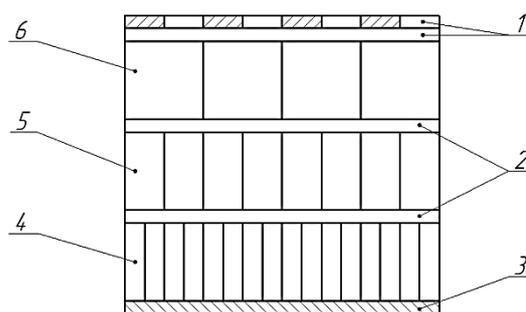


Рис. 2. Сотовая панель:

1. Перфорированная обшивка-сетка С 685;
2. Слои сеток; 3. Сплошная обшивка;
- 4,5,6. Слои сотового заполнителя

Верхний несущий слой панели выбирается с учетом оценки эффективности конструкции. Рассмотрены варианты применения в качестве конструктивных элементов несущего слоя перфорированной обшивки из Д16АМ

толщиной 1,2 мм и сетки С 685 из 12Х18Н10Т по ТУ 144-697-76. В качестве средних слоев сотовой панели использовались сетки С 685, которые соединялись со слоями сотового заполнителя, выполненного из стеклопластика. Звуковая волна, попадая на наружную обшивку, теряя энергию. Наиболее эффективная потеря энергии происходит в средних слоях сеток панели.

Слоистая панель состоит из трех слоев [5] сотового заполнителя, плотность которых находится в соотношении 1:2:3 и увеличивается от верхнего слоя к нижнему. Каждый из слоев сотового заполнителя настроен на определенный диапазон частот, в котором наблюдается пик поглощения звука. Наличие в панели слоев заполнителя различной плотности обеспечивает расширение спектра поглощаемых частот, повышает эффективность панели.

Проведенные акустические испытания панелей подтвердили актуальность в выборе направления в разработке новых конструкций, обеспечивающих соответствие самолетов требованиям 14-й главы ИКАО.

Проведены расчеты плотности слоев сотового заполнителя, определяемой по зависимости [1], [4].

$$\rho = 1,54 \frac{\delta}{a} \rho_m,$$

где δ - толщина материала ячейки заполнителя (см)

a - длина стороны шестигранной ячейки сотового заполнителя

ρ_m - плотность материала сотового заполнителя (1,6 г/см³)

Проведена оценка плотности сотового заполнителя для каждого слоя. Результаты расчетов представлены в табл. 1 и на рис. 3.

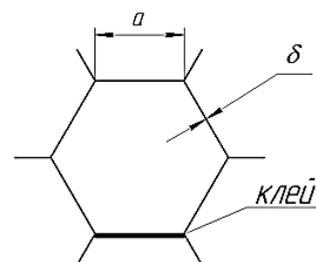


Рис. 3

Зависимость плотности ρ от размера стороны ячейки представлена на рис. 4.

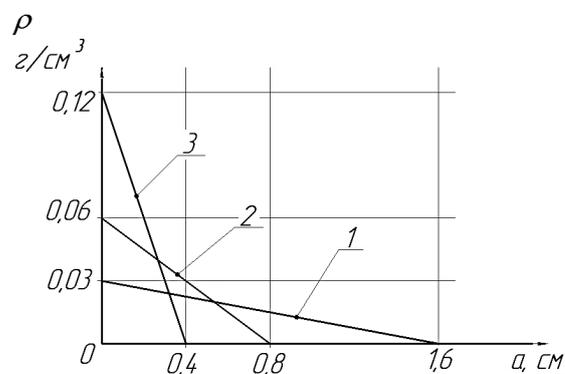


Рис. 4. График зависимости плотности от размера стороны ячейки: 1. Верхний слой; 2. Средний слой; 3. Нижний слой

Определение прочности сотового заполнителя при поперечном сжатии

Испытания проводили на установке Р-10, с записью диаграмм $\sigma(\epsilon)$

Испытания проводили по ТУ 1-596-486-2011. Образцы для испытания слоев сотового заполнителя панели в плане имели форму квадрата, площадь которого равна $F=36 \text{ см}^2$ и толщиной 15 мм. Испытания проводили до потери устойчивости образца сотового заполнителя.

Результаты прочностных испытаний на сжатие образцов сотового заполнителя приведены в табл. 2 и на рис. 5.

Таблица 1
Расчет плотности сотового заполнителя для каждого слоя

№ п/п	Слой сотового заполнителя	a , см	δ , см	ρ_m , г/см ³	ρ , г/см ³
1	Верхний слой	1,6	0,02	1,6	0,03
2	Средний слой	0,8	0,02	1,6	0,06
3	Нижний слой	0,4	0,02	1,6	0,12

Таблица 2

Результаты прочностных испытаний на сжатие образцов сотовой панели

Слой панели	σ_B , МПа	a, см	δ , см	ρ , г/см ³
Верхний слой	1,9	1,6	0,02	1,6
Средний слой	2,4	0,8	0,02	1,6
Нижний слой	2,9	0,4	0,02	1,6

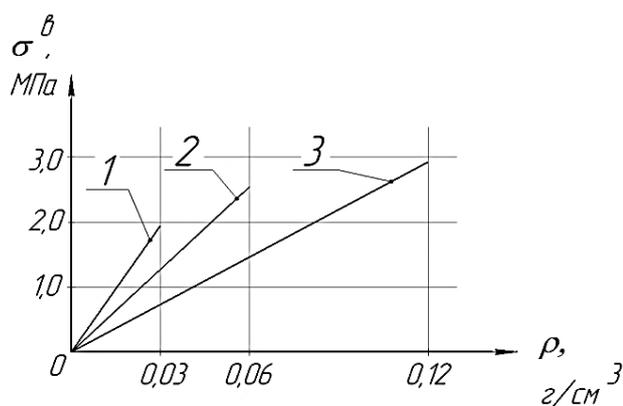


Рис. 5. График зависимости предела прочности σ^B от плотности ρ 1:2:3

Результаты испытаний показали, что потеря устойчивости образцов сотового заполнителя происходит в верхнем слое панели с низкой плотностью.

Технологический процесс изготовления сотовой панели (рис. 6)

Перфорация обшивки осуществляется в штампе, где обеспечивается точность и качество получаемых отверстий

Для склейки обшивок и сеток с сотовым заполнителем применяется клей ВК-36.

Предел прочности панелей на сжатие больше значений, полученных при испытании сотового заполнителя на 1-2 МПа рис. 7.

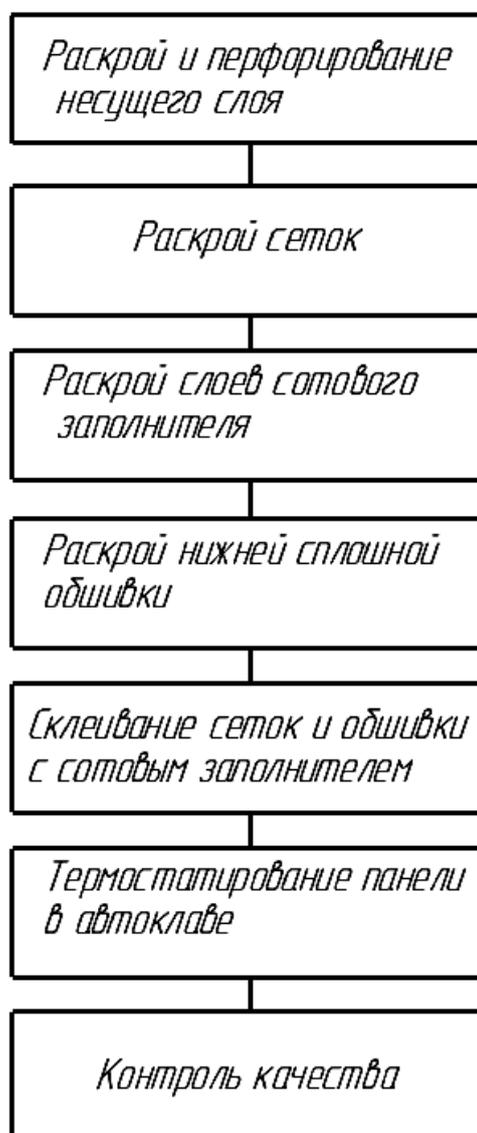


Рис. 6. Схема технологического процесса изготовления сотовой панели

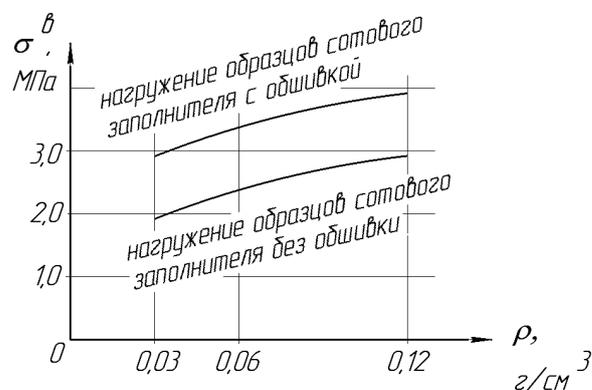


Рис. 7. Сравнительные значения σ^B образцов сотового заполнителя и панели

Проведена оценка весовых параметров базовых и новых конструкций слоистых панелей. Вес панели базового варианта определяется:

$$G'_\delta = \rho_c V_c + \rho_{по} V_{по} + \rho_{со} V_{со} = 1350 + 10665 + 3950 = 15965 \text{ г.},$$

где ρ_c – плотность слоев сотового заполнителя;

V_c – объем слоев сотового заполнителя;

$\rho_{по}$ – плотность перфорированных обшивок;

$V_{по}$ – объем перфорированных обшивок;

$\rho_{со}$ – плотность сплошной обшивки;

$V_{со}$ – объем сплошной обшивки.

Вес панели новой конструкции с несущими обшивками из сеток С685, выполненных по ТУ 144-697-76:

$$G''_н = \rho_c V_c + \rho_{ст} V_{ст} + \rho_{со} V_{со} = 3150 + 1900 + 3950 = 9000 \text{ г.}$$

Вес панели новой конструкции с несущей перфорированной обшивкой и средними обшивками из сеток:

$$G'''_н = \rho_c V_c + \rho_{по} V_{по} + \rho_{со} V_{со} + \rho_{ст} V_{ст} = 3550 + 3950 + 1267 + 3950 = 12717 \text{ г.}$$

Расчет проведен для панели размером 1000×1000 и высотой 45 мм.

Весовые параметры панелей базового варианта и разработанной новой конструкции панели представлены на рис. 8.

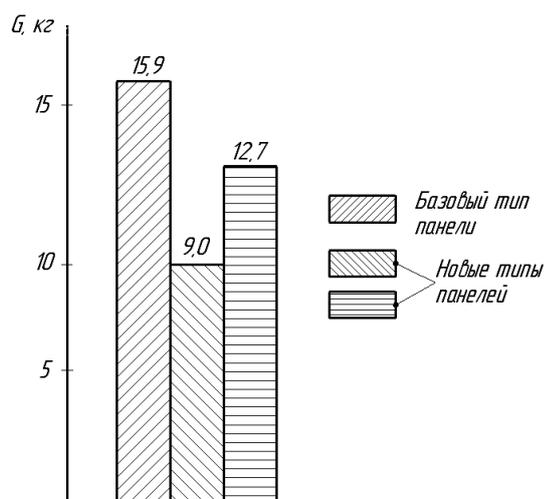


Рис. 8. Весовые параметры панелей базового варианта и разработанной новой конструкции панели

Заключение

1. В приведенной статье рассмотрен базовый вариант слоистых панелей, устанавливаемых в каналах воздухозаборников гражданских самолётов для обеспечения 4 главы ИКАО.

2. Для обеспечения достижения самолётами 14 главы ИКАО разработана новая конструкция слоистой панели, акустические испытания которой подтвердили её эффективность.

3. Выполнена оценка прочностных испытаний, которая позволяет прогнозировать выбор параметров слоёв сотового заполнителя панели с обеспечением их устойчивости.

4. Приведенная схема технологического процесса определяет этапы получения слоистой панели требуемого качества.

5. Проведенный весовой расчёт панели показал, что по сравнению с существующими конструкциями она обеспечивает снижение веса более чем в 1,5 раза.

6. Разработанная конструкция панели может быть реализована в каналах воздухозаборников средне- и дальнемагистральных самолётов для обеспечения Международного стандарта 14 Главы ИКАО.

Литература

1. Шульдешов Е.М., Краев И.Д., Платонов М.М. Полимерная композиционная звукопоглощающая конструкция // Труды ВИАМ. 2017. № 5 (53). С. 56-61.
2. Панин В.Ф. Конструкции с сотовым заполнителем. М.: Машиностроение, 1982. 152 с.
3. Патент на изобретение № 2588516. Комбинированная сотовая панель / Максименков В.И., Молод М.В. и др.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет, 2016. 5 с.
4. Крысин В.Н. Технологические процессы формования, намотки и склеивания конструкций. М.: Машиностроение, 1989. 234 с.
5. Любин Дж. Справочник по композиционным материалам / под ред. Дж. Любина. М.: Машиностроение, 1989. Т. 2. 250 с.

Информация об авторах

Максименков Владимир Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры самолётостроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: maksimenkov.v.i@mail.ru

Молод Марина Владиславовна – д-р техн. наук, доцент кафедры самолётостроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: molodmv@yandex.ru

Огурцов Павел Сергеевич – главный специалист по неметаллам и композиционным материалам, филиал ПАО «ИЛ» Воронежского акционерного самолетостроительного общества (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, 27), e-mail: ogurzowps@mail.ru

LAYERED PANEL FOR THE AIR INTAKE CHANNEL OF THE AIRCRAFT

V.I. Maksimenkov¹, M.V. Molod¹, P.S. Ogurtsov²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

² Branch of PJSC "IL" - VASO, Voronezh, Russia

Abstract: the article deals with the issues of analysis of honeycomb panels used in aircraft structures. The three-layer honeycomb panels used in the design of passenger aircraft, which provide the 4th chapter of the International ICAO Standard, are given. The task was set to increase the acoustic efficiency of layered panels by creating new structures. A three-layer design is presented, confirmed by a patent, which consists of an upper carrier layer made of perforated skin and C 685 meshes, and layers of honeycomb core, the density of which varies from the upper layer to the lower one in the ratio 1:2:3. This design expands the frequency spectrum, providing broadband noise absorption. Calculations of the density of each layer of the honeycomb panel are made. Strength calculations of samples of honeycomb filler with different densities were carried out. The obtained values of the ultimate compressive strength determine the choice of a layered structure, taking into account the allowable requirements. A technological process for the manufacture of a three-layer panel has been developed, which makes it possible to obtain layered panels of the required quality. A weight calculation was carried out, which makes it possible to determine that the developed design practically reduces the weight by more than 1.5 times compared to the base case. The tests carried out revealed the acoustic efficiency of this design by more than 2 times compared to the base case

Key words: honeycomb panel, density, technological process, grid, air intake channel

References

1. Shuldeshov E.M., Kraev I.D., Platonov M.M. "Polymer composite sound-absorbing construction", *Proceedings of VIAM (Trudy VIAM)*, no. 5 (53), 2017, pp. 56-61.
2. Panin V.F. "Structures with honeycomb core" ("Konstruktsii s sotovym zapolnitelem"), Moscow: Mashinostroyeniye, 1982, 152 p.
3. Maksimenkov V.I., Molod M.V. et al. "Combined honeycomb panel" ("Kombinirovannaya sotovaya panel"), Patent of RF no. 2588516, cop. holder Voronezh State Technical University, 2016.
4. Krysin V.N. "Technological processes of forming, winding and gluing structures" ("Tekhnologicheskiye protsessy formovaniya, namotki i skleivaniya konstruktsiy"), Moscow: Mashinostroyeniye, 1989, 234 p.
5. Lubin J. "Handbook of composite materials" ("Spravochnik po kompozitsionnym materialam"), vol. 2, Moscow: Mashinostroyeniye, 1989, 250 p.

Submitted 06.03.2023; revised 17.04.2023

Information about the authors

Vladimir I. Maksimenkov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Department of Aircraft Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: maksimenkov.v.i@mail.ru

Marina V. Molod, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Aircraft Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), E-mail: molodmv@yandex.ru

Pavel S. Ogurtsov, Chief Specialist in Nonmetals and Composite Materials of the Voronezh Aircraft Building Company PJSC "Voronezh Joint Stock Aircraft Building Company" (27 Tsiolkovskogo str., Voronezh 394029, Russia), e-mail: ogurzowps@mail.ru