

ISSN print 2658-3488  
ISSN online 2658-6436

№1(23)  
**2024**

Научно-технический журнал

# Автоматизация и моделирование

в проектировании и управлении



# АВТОМАТИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ



## В проектировании и управлении

Издается с 2018 года

№ 1(23) 2024

DOI:10.30987/issn.2658-3488

### ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Учредитель издания – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Брянский государственный технический университет» (БГТУ)

Председатель редакционного совета – Сигов А.С., д-р. физ.-мат. наук, проф., академик РАН

Заместитель председателя редакционного совета – Аверченков А.В., д-р. техн. наук, доц.

Заместитель председателя редакционного совета – Федонин О.Н., д-р. техн. наук, проф.

**Бобыр М.В.**, д-р. техн. наук, проф. (Курск)  
**Бочкарев П.Ю.**, д-р. техн. наук, проф. (Саратов)  
**Еременко В.Т.**, д-р. техн. наук, проф. (Орел)  
**Ивашук О.А.**, д-р. техн. наук, проф. (Белгород)  
**Иньков Ю.М.**, д-р. техн. наук, проф. (Москва)

**Карпенко А.П.**, д-р. физ.-мат. наук, проф. (Москва)

**Квятковская И.Ю.**, д-р. техн. наук, проф. (Астрахань)

**Кравец А.Г.**, д-р. техн. наук, проф. (Волгоград)

**Курейчик В.В.**, д-р. техн. наук, проф. (Таганрог)

**Макарова Е.И.**, д-р. техн. наук, доц. (Санкт-Петербург)

**Мешеряков В.Н.**, д-р. техн. наук, проф. (Липецк)

**Михальченко С.Г.**, д-р. техн. наук, доц. (Томск)

#### Редколлегия

Главный редактор – **Аверченков В.И.** д-р. техн. наук, проф.

Зам. главного редактора – **Захарова А.А.** д-р. техн. наук, доц.

Зам. главного редактора – **Пугачев А.А.** д-р. техн. наук, доц.

Зам. главного редактора – **Малаханов А.А.** канд. техн. наук, доц.

**Никитин В.В.**, д-р. техн. наук, доц. (Санкт-Петербург)

**Носков С.И.**, д-р. техн. наук, проф. (Иркутск)

**Петрешин Д.И.**, д-р. техн. наук, доц. (Брянск)

**Подвесовский А.Г.**, канд. техн. наук, доц. (Брянск)

**Пугачев А.А.**, д-р. техн. наук, доц. (Брянск)

**Пылькин А.Н.**, д-р. техн. наук, проф. (Рязань)

**Скрыпников А.В.**, д-р. техн. наук, проф. (Воронеж)

**Федяева Г.А.**, д-р. техн. наук, доц. (Брянск)

**Феофанов А.Н.**, д-р. техн. наук, проф. (Москва)

**Хейфец М.Л.**, д-р. техн. наук, проф. (Беларусь)

**Чепчуров М.С.**, д-р. техн. наук, проф. (Белгород)

**Шептунов С.А.**, д-р. техн. наук, проф. (Москва)

**Ярушкина Н.Г.**, д-р. техн. наук, проф. (Ульяновск)

Зам. главного редактора – **Подвесовский А.Г.** канд. техн. наук, доц.

Адрес редакции:

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

тел.: (4832) 56-49-90

www.aimpu.ru

E-mail: aim-pu@mail.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-73192 от 02 июля 2018 года

ISSN print: 2658-3488

ISSN online: 2658-6436

Журнал распространяется по подписке:

индекс Э80855 по интернет-каталогу

"Пресса по подписке".

Статьи журнала находятся под лицензией CC BY 4.0 Creative Commons Attribution 4.0 License

Журнал включен в специализированный референтный библиографический сервис CrossRef

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук по научным специальностям: 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; 2.3.4. – Управление в организационных системах; 2.3.3. – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами; 2.3.7 – Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования; 2.4.2. – Электротехнические комплексы и системы.

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

# **AUTOMATION AND MODELING**

SCIENTIFIC TECHNICAL  
JOURNAL



## **in design and management**

Issued since 2018

№ 1(23) 2024

DOI:10.30987/issn.2658-3488

### **QUARTERLY SCIENTIFIC JOURNAL**

The founder of the publication – the Federal state budgetary educational  
institution of higher education

**«Bryansk State Technical University» (BSTU)**

*Chairman of Editorial Board – Sigov A.S., D. Phys.-Mat., Professor, Academician of RAS*

*Deputy Chairman of Editorial Board – Averchenkov A.V., D. Eng., Associate professor*

*Deputy Chairman of the editorial Board – Fedonin O.N., D. Eng., Professor*

**M.Yu. Bobyr, D. Eng., Prof., (Kursk)**

**P.Yu. Bochkaryov, D. Eng., Prof., (Saratov)**

**V.T. Yeremenko, D. Eng., Prof., (Orel)**

**O.A. Ivashchuk, D. Eng., Prof., (Belgorod)**

**Yu.M. Inkov, D. Eng., Prof., (Moscow)**

**A.P. Karpenko, D. Phys.-Mat., Prof., (Moscow)**

**I.Yu. Kvyatkovskaya, D. Eng., Prof., (Astrakhan)**

**A.G. Kravets, D. Eng., Prof., (Volgograd)**

**V.V. Kureichik, D. Eng., Prof., (Taganrog)**

**E.I. Makarova, D. Eng., Assoc. Prof.,**

*(St. Petersburg)*

**V.N. Meshcheryakov, D. Eng., Prof., (Lipetsk)**

**S.G. Mikhilchenko, D. Eng., Assoc. Prof. (Tomsk)**

**V.V. Nikitin, D. Eng., Assoc. Prof., (St. Petersburg)**

**S.Yu. Noskov, D. Eng., Prof., (Irkutsk)**

**D.I. Petreshin, D. Eng., Assoc. Prof., (Bryansk)**

**A.G. Podvesovskiy, Can. Eng., Assoc. Prof.**  
*(Bryansk)*

**A.A. Pugachev, D. Eng., Assoc. Prof., (Bryansk)**

**A.N. Pylkin, D. Eng., Prof., (Bryansk)**

**A.V. Skrypnikov, D. Eng., Prof., (Voronezh)**

**G.A. Fedyayeva, D. Eng., Assoc. Prof., (Bryansk)**

**A.N. Feofanov, D. Eng., Prof., (Moscow)**

**M.L. Kheifets, D. Eng., Prof., (Minsk, Belarus)**

**M.S. Chepchurov, D. Eng., Prof., (Belgorod)**

**S.A. Sheptunov, D. Eng., Prof., (Moscow)**

**N.G. Yarushkina, D. Eng., Prof., (Ulyanovsk)**

*Editorial board*

*Editor-in-Chief – Averchenkov V.I. D. Eng., Prof.,*

*Deputy Editor-in Chief – Zakharova A.A. D. Eng.,  
Assoc. Prof.*

*Deputy Editor-in Chief – Pugachev A.A. D. Eng.,  
Assoc. Prof.*

*Deputy Editor-in Chief – Malakhanov A.A. Can.  
Eng., Assoc. Prof.*

*Deputy Editor-in Chief – Podvesovskiy A.G. Can.  
Eng., Assoc. Prof.*

*Address of edition 7, 50 Years of October Avenue,  
Bryansk, Russia, 241035*

*Tel.: (4832) 56-49-90*

*www.aimpu.ru*

*E-mail: aim-pu@mail.ru*

The Journal is registered by the Federal  
Service for Supervision in the Sphere of Telecom,  
Information Technologies and Mass Communications  
of Russian Federation (ROSKOMNADZOR).  
Registration certificate ПИ № ФЦ77-73192 of July 2, 2018

ISSN print: 2658-3488

ISSN online: 2658-6436

The magazine is distributed by subscription:  
index **Э80855** in the online catalog "Subscription Press".

**The articles of the journal are under the CC BY 4.0 Creative Commons Attribution 4.0 License.**

**Journal is included in a specialized consultant bibliographical service CrossRef**

**Scientific topics of the journal: Automation and control of technological processes and industries; Mathematical modeling, numerical methods and software packages; Management in organizational systems; Computer modeling and design automation; Electrotechnical complexes and systems.**

Reprinting, all kinds of material copying and reproduction of materials published in the journal «Automation and modeling in design and management» is allowed only with the Editorial Board's permission and a reference to the source of information

## СОДЕРЖАНИЕ

### Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования

**Кривонос В.А., Корнев А.В.** Система автоматического управления технологическим объектом второго порядка с запаздыванием на основе регулятора состояния

**Орехов Д.В.** Анализ эффективности автоматизации проектирования гидравлических станций

### Математическое и компьютерное моделирование

**Беляев И.С., Петров А.М., Попов А.Н.** Разработка модели ВР-схемы на основе теории автоматов и с применением методов квантового программирования

**Быкова А.В., Бекмешов А.Ю.** Формализация бизнес-процессов предприятия при моделировании автоматизированной системы управления взаимоотношениями с клиентами

**Меньших В.В., Лихобабица А.В.** Моделирование процессов оптимизации выбора программ подготовки и переподготовки специалистов с использованием генетического алгоритма

**Перевезенцев В.Т., Шилин М.А., Дорошенко А.Н., Ивашов Р.А.** Использование сотовой поверхности для повышения интенсивности теплообмена в сопловых лопатках газовых турбин

### Управление в организационных системах

**Батюкова Л.Е., Карлова Т.В.** Методика обеспечения безопасности транзакций на основе использования антифрод-системы

**Попов А.О., Карлова Т.В., Шептунов С.А.** Оценка достоверности данных электронной среды предприятия на основе моделей и алгоритмов интеллектуальной поддержки документооборота как ключевой фактор обеспечения эффективного управления предприятием

**Седаков К.А., Рытов М.Ю.** Разработка алгоритма оценки эффективности мер и средств защиты персональных данных в сфере здравоохранения

### Электротехнические комплексы и системы

**Сиротский М.С., Пугачев А.А.** Математическое моделирование срока службы свинцово-кислотных аккумуляторных батарей для источников бесперебойного питания

## CONTENTS

### Automation and control of technological processes and production, automated design systems

**Krivosov V.A., Korenev A.V.** Automatic Control System for Second-Order Technological Process with Time Delay Based on State Feedback Controller 4

**Orekhov D.V.** Analysing the Effectiveness of the Computer-Aided Design of Hydraulic Stations 13

### Mathematical and computer modeling

**Belyaev I.S., Petrov A.M., Popov A.N.** Development of a BP-Scheme Model Based on the Automata Theory and Using Quantum Programming Methods 21

**Bykova A.V., Bekmeshov A.Yu.** Formalizing Enterprise's Business Processes When Modelling an Automated Customer Relationship Management System 33

**Menshikh V.V., Likhobabina A.V.** Simulating Optimization Processes for the Selection of Training and Retraining Programs for Specialists Using a Genetic Algorithm 42

**Perevezentsev V.T., Shilin M.A., Doroshnikov A.N., Ivashov R.A.** Use of Honeycomb Surface to Increase the Heat Exchange Intensity in Nozzle Blades of Gas Turbines 49

### Management in organizational systems

**Batyukova L.E., Karlova T.V.** Methodology for Ensuring the Transaction Security Based on Using an Anti-Fraud System 58

**Popov A.O., Karlova T.V., Sheptunov S.A.** Assessing the Reliability of Data in the Enterprise Electronic Environment Based on Models and Algorithms for Intelligent Document Management Support as a Key Factor for Effective Enterprise Management 65

**Sedakov K.A., Rytov M.Yu.** Developing an Algorithm for Assessing the Effectiveness of Measures and Means of Personal Data Protection in the Healthcare Sector 73

### Electrotechnical complexes and systems

**Sirotskiy M.S., Pugachev A.A.** Mathematical Modeling of Lifetime of Lead Acid Batteries for Uninterruptible Power Supplies 81



## ***Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования***

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 681.5

doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-4-12

### **СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ ВТОРОГО ПОРЯДКА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ НА ОСНОВЕ РЕГУЛЯТОРА СОСТОЯНИЯ**

**Владимир Алексеевич Кривонос<sup>1</sup>, Артем Викторович Корнев<sup>2✉</sup>**

<sup>1, 2</sup> Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Старый Оскол, Россия

<sup>1</sup> krivonosov\_v\_a@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0002-9615-2561>

<sup>2</sup> korenev01@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7252-7272>

**Аннотация.** Рассматривается построение системы автоматического управления (САУ) технологическими объектами на основе регулятора состояния с наблюдателем, непрерывно оценивающим координаты состояния объекта и низкочастотную составляющую входного возмущения. В качестве примера рассмотрен процесс построения САУ для технологического объекта, математическая модель которого может быть представлена в виде последовательного соединения апериодического звена второго порядка и звена запаздывания. Неизменяемая часть САУ включает объект управления и исполнительное устройство, модель которого описывается апериодическим звеном первого порядка. Подробно изложена предлагаемая процедура разработки структуры и определения коэффициентов коррекции движения наблюдателя, позволяющая обеспечить приемлемую скорость сходимости процесса наблюдения с учетом интенсивности помех измерения выходного сигнала объекта. Проведен сравнительный анализ качества функционирования разработанной САУ и альтернативной САУ на основе ПИД-регулятора. Настройка параметров регулятора состояния и ПИД-регулятора выполнена в режиме отработки ступенчатого задания при отсутствии входных возмущающих воздействий. Для настройки использованы процедуры многократного моделирования переходных процессов в MATLAB SIMULINK. Сравнительный анализ качества САУ выполнен по инженерным показателям функционирования систем при различных вариантах сочетания задающего и возмущающего воздействий. Результаты анализа показали, что система с регулятором состояния обеспечивает существенно более высокое качество управления во всех контрольных режимах. Проведенные исследования позволяют рекомендовать разработку и внедрение САУ с наблюдателем и регулятором состояния для повышения эффективности управления достаточно широким классом реальных технологических объектов, которые могут быть описаны апериодическим звеном второго порядка с запаздыванием.

**Ключевые слова:** САУ, пространство состояний, наблюдатель координат состояния, оценка возмущения, регулятор состояния, ПИД-регулятор

**Для цитирования:** Кривонос В.А., Корнев А.В. Система автоматического управления технологическим объектом второго порядка с запаздыванием на основе регулятора состояния // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №1 (23). С.4-12. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-4-12.

Original article

Open Access Article

# AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR SECOND-ORDER TECHNOLOGICAL PROCESS WITH TIME DELAY BASED ON STATE FEEDBACK CONTROLLER

Vladimir A. Krivonosov<sup>1</sup>, Artem V. Korenev<sup>2</sup>✉

<sup>1, 2</sup> Stary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) of MISiS University of Science and Technology, Stary Oskol, Russia

<sup>1</sup> krivonosov\_v\_a@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0002-9615-2561>

<sup>2</sup> korenev01@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7252-7272>

**Abstract.** *The paper considers the construction of an automatic control system (ACS) for technological objects based on a state feedback controller with an observer continuously estimating the object state coordinates and the low-frequency component of the input disturbance. As an example, the paper considers the process of constructing an ACS for a technological object whose mathematical model can be represented as a serial connection of a second-order aperiodic link and a delay link. The invariant part of the ACS includes a control object and an actuator, the model of which is described by a first-order aperiodic link. The paper describes in detail the proposed procedure for developing the structure and determining the correction coefficients for the motion observer, which allows ensuring an acceptable speed of convergence of the observation process, taking into account the intensity of measurement noise of the object output signal. A comparative analysis of the quality of the developed ACS and an alternative ACS based on the PID-regulator is carried out. The parameters of the state regulator and the PID-regulator are configured in the mode of processing a step response in the absence of input disturbing influences. For configuration, procedures for multiple simulations of transients in MATLAB SIMULINK are used. The comparative analysis of ACS quality is performed according to engineering performance indicators of systems under various combinations of setting and disturbing influences. The results of the analysis show that the system with the state controller provides a significantly higher control quality in all control modes. The conducted studies allow recommending the development and implementation of ACS with an observer and a state regulator to improve the control efficiency of a fairly wide class of real technological objects, which can be described by a second-order aperiodic link with a delay.*

**Keywords:** ACS, state space, state coordinate observer, disturbance estimation, state controller, PID-regulator

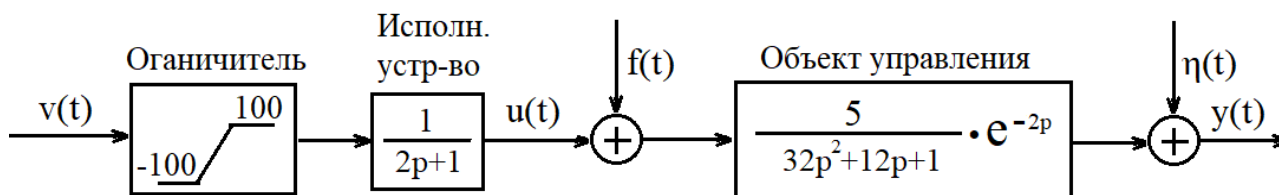
**For citation:** Krivonosov V.A., Korenev A.V. Automatic Control System for Second-Order Technological Process with Time Delay Based on State Feedback Controller. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 1 (23), pp. 4-12. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-4-12.

## Введение

В настоящее время САУ технологических объектов управления чаще всего строятся на основе ПИ- и ПИД-регуляторов [1, 2]. Существует ряд сравнительно простых методик настройки таких регуляторов, применение которых позволяет добиться приемлемого качества управления, и которыми владеет персонал служб автоматизации предприятий. Кроме того, в большинстве контроллеров, используемых при построении САУ, имеются программы, реализующие ПИД-регуляторы.

Эффективность функционирования многих промышленных объектов существенно зависит от точности поддержания заданного технологического режима в условиях действия не измеряемых возмущений, что предъявляет повышенные требования к качеству функционирования САУ. Однако САУ на основе ПИД-регуляторов не всегда способны обеспечить и высокое качество отработки изменения задания и эффективно подавлять действие возмущения.

Одним из альтернативных вариантов САУ технологическими объектами являются системы, в которых используются регуляторы состояния [3]. Такая система использует наблюдатель, который оценивает координаты состояния и низкочастотную составляющую не измеряемого возмущения. Рассмотрим подробнее процесс разработки такой САУ на примере системы, неизменяемая часть которой представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Структурная схема неизменяемой части системы управления**  
**Fig. 1. Block diagram of the immutable part of the control system**

Сигнал управления  $v(t)$ , сформированный регулятором, перед подачей на исполнительное устройство ограничивается. На вход объекта подается управляющее воздействие  $u(t)$  и не измеряемое возмущение  $f(t)$ . Выход объекта  $y(t)$  измеряется с помехой  $\eta(t)$ , имеющей нулевое математическое ожидание. Математическая модель объекта описывается последовательным соединением аperiodического звена второго порядка и звена запаздывания.

### Разработка САУ на основе регулятора состояния неизменяемой части

Неизменяемая часть системы включает два динамических звена:

- объект управления, математическая модель которого включает последовательное соединение аperiodического звена второго порядка и звена запаздывания;
- исполнительное устройство описывается аperiodическим звеном первого порядка, выход которого – положение исполнительного устройства измеряется.

Структурная схема разрабатываемой САУ приведена на рис. 2.

В управляющей части системы используется наблюдатель, оценивающий координаты состояния объекта и возмущение  $f(t)$  [4 – 6], а также регулятор состояния [7].

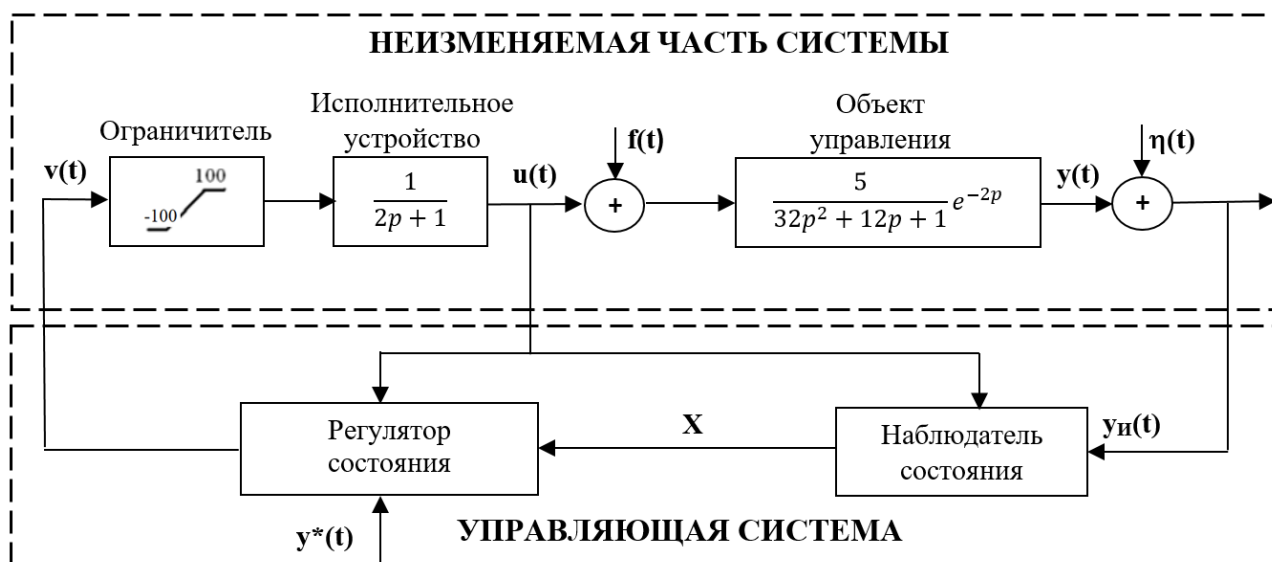


Рис. 2. Структурная схема системы управления  
Fig. 2. Block diagram of the control system

Выход объекта  $y(t)$  измеряется с погрешностью  $\eta(t)$ , и результат измерения  $y_u(t)$ , а также измеряемый выход исполнительного устройства  $u(t)$  используются наблюдателем для оценки координат состояния объекта и возмущения  $f(t)$ .

Заменим передаточную функцию  $e^{-2p}$  в объекте при помощи аппроксимации Паде для экспоненциальных функций [8, 9]:

$$W_{ov}(p) = \frac{5}{32p^2 + 12p + 1} \cdot \frac{1-p}{1+p} = \frac{5-5p}{32p^3 + 44p^2 + 13p + 1}.$$

Запишем дифференциальное уравнение объекта в операторной форме:

$$(32p^3 + 44p^2 + 13p + 1)y(t) = (5 - 5p)u(t), \quad (1)$$

где  $p$  – оператор дифференцирования.

Первую координату состояния объекта  $x_1(t)$  выберем, разделив обе части (1) на произведение операторов  $(32p^3 + 44p^2 + 13p + 1)(5 - 5p)$ :

$$(5 - 5p)^{-1}y = (32p^3 + 44p^2 + 13p + 1)^{-1}(u + f) = x_1(t).$$

Остальные координаты выберем следующим образом:  $x_2(t) = x_1'(t)$ ;  $x_3(t) = x_2'(t)$ ;  $x_4(t) = f(t)$ . Символом «'» здесь и далее обозначена производная по времени.

Объект управления является фильтром низкой частоты, который достаточно эффективно подавляет высокочастотные составляющие возмущения  $f(t)$ . Только низкочастотные составляющие  $f(t)$  будет оценивать наблюдатель и подавлять регулятор. Поэтому в модели объекта и наблюдателя будем предполагать, что  $f(t) = \text{const}$ .

Уравнения, описывающие движение объекта в пространстве выбранных координат состояния, имеет вид системы нормальных уравнений:

$$\begin{cases} x_1'(t) = x_2(t); \\ x_2'(t) = x_3(t); \\ x_3'(t) = \frac{1}{32}(-44x_3(t) - 13x_2(t) - x_1(t) + u(t) + f(t)); \\ x_4'(t) = 0. \end{cases}$$

Уравнение, связывающее выход объекта  $y(t)$  с координатами состояния, имеет вид:

$$y(t) = 5x_1(t) - 5x_2(t).$$

В матричной форме уравнения, описывающие движение объекта и связь выхода с координатами состояния, можно представить следующим образом [10]:

$$\begin{cases} X'(t) = AX(t) + B(u(t) + f(t)); \\ Y(t) = CX(t). \end{cases}$$

где  $X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}$  – вектор текущих значений координат состояния объекта;

$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{1}{32} & -\frac{13}{32} & -\frac{44}{32} & \frac{1}{32} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$  – собственная матрица модели объекта управления;

$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{32} \\ 0 \end{bmatrix}$  – вектор влияния управляющего воздействия на координаты состояния;

$C = [5 \quad -5 \quad 0 \quad 0]$  – вектор связи измеряемого выхода  $y(t)$  с координатами состояния.

Математическая модель, описывающая изменение оценок, формируемых наблюдателем, имеет вид следующей системы нормальных уравнений:

$$\begin{cases} x_{1\text{наб}}'(t) = x_{2\text{наб}}(t) + k_1\Delta y(t); \\ x_{2\text{наб}}'(t) = x_{3\text{наб}}(t) + k_2\Delta y(t); \\ x_{3\text{наб}}'(t) = \frac{1}{32}(-44x_{3\text{наб}}(t) - 13x_{2\text{наб}}(t) - x_{1\text{наб}}(t) + u(t) + x_{4\text{наб}}(t)) + k_3\Delta y(t); \\ x_{4\text{наб}}'(t) = k_4\Delta y(t). \end{cases}$$

Где  $x_{i\text{наб}}(t)$  и  $x_{i\text{наб}}'(t)$  – оценки соответственно  $i$ -й координаты состояния и её производной наблюдателем;  $k_i$  – коэффициенты, вносящие коррекцию в движение  $x_{i\text{наб}}(t)$  в наблюдателе по результатам измерения выхода объекта  $y_u(t)$ ;  $\Delta y(t) = y_u(t) - y_{\text{наб}}(t)$  – отклонение оценки  $y_{\text{наб}}(t)$  наблюдателем выхода объекта от результата измерения  $y_u(t)$ .

Оценка выхода объекта наблюдателем состояния имеет следующее значение:

$$y_{\text{наб}}(t) = 5x_{1\text{наб}}(t) - 5x_{2\text{наб}}(t),$$



Матрица коррекции  $K = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix}$  влияет на скорость сходимости оценок  $x_{\text{наб}}(t)$  к истинным

значениям  $x_i(t)$  координат состояния объекта и на чувствительность оценок к погрешностям  $\eta(t)$  измерения выхода.

Необходимым условием сходимости оценок  $x_{\text{наб}}(t)$  к значениям  $x_i(t)$  является отрицательность вещественных частей всех четырех собственных чисел  $\lambda_i$  матрицы  $A - KC$  движения оценок наблюдателя. Значения  $\lambda_i$  ( $i=1, \dots, 4$ ) являются решениями характеристического уравнения наблюдателя:

$$\det(A - KC - \lambda I) = 0;$$

$$\det \begin{bmatrix} -\lambda - 5k_1 & 5k_1 + 1 & 0 & 0 \\ -5k_2 & -\lambda + 5k_2 & 1 & 0 \\ -5k_3 - \frac{1}{32} & 5k_3 - \frac{13}{32} & -\lambda - \frac{11}{8} & \frac{1}{32} \\ -5k_4 & 5k_4 & 0 & -\lambda \end{bmatrix} = 0.$$

где  $\det$  – определитель квадратной матрицы;  $I$  – единичная 4x4 матрица.

Вычислим определитель и сгруппируем уравнение по степеням  $\lambda$ :

$$\lambda^4 + \lambda^3(5k_1 - 5k_2 + \frac{11}{8}) + \lambda^2(\frac{55}{8}k_1 - \frac{11}{8}k_2 - 5k_3 + \frac{13}{32}) + \lambda(\frac{35}{16}k_1 + \frac{55}{8}k_2 + 5k_3 - \frac{5}{32}k_4 + \frac{1}{32}) + \frac{5}{32}k_4 = 0.$$

Выберем все собственные числа  $\lambda_i$ , равными  $-2$ . Уравнение, в котором полином четвертого порядка относительно  $\lambda$  имеет все корни, равные  $-2$ , запишем следующим образом:

$$(\lambda + 2)^4 = \lambda^4 + 8\lambda^3 + 24\lambda^2 + 32\lambda + 16.$$

Приравняем коэффициенты при одинаковых степенях  $\lambda$  и решим систему уравнений:

$$\begin{cases} 5k_1 - 5k_2 + \frac{11}{8} = 8; \\ \frac{55}{8}k_1 - \frac{11}{8}k_2 - 5k_3 + \frac{13}{32} = 24; \\ \frac{35}{16}k_1 + \frac{55}{8}k_2 + 5k_3 - \frac{5}{32}k_4 + \frac{1}{32} = 32; \\ \frac{5}{32}k_4 = 16. \end{cases}$$

Получаем значения коэффициентов коррекции наблюдателя:

$$\begin{cases} k_1 = 5,41; \\ k_2 = 4,09; \\ k_3 = 1,60; \\ k_4 = 102,40. \end{cases}$$

При выборе собственных чисел  $\lambda_i$ , влияющих на коэффициенты коррекции  $k_i$ , необходимо учитывать, что уменьшение  $\lambda_i$  ускоряет процесс наблюдения и повышает чувствительность оценок наблюдателя к погрешностям  $\eta(t)$  измерения выхода объекта.

Регулятор состояния получает информацию о текущих значениях следующих сигналов:

- задающее воздействие (уставка)  $y^*(t)$ ;
- оценка  $(x_{1\text{наб}}(t), x_{2\text{наб}}(t), x_{3\text{наб}}(t), x_{4\text{наб}}(t))^T$  наблюдателем вектора  $(x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t))^T$  координат состояния объекта, где  $T$  – символ транспонирования;
- $x_5(t) = u(t)$  – измеренное значение выхода исполнительного устройства системы.

Определим желаемые значения координат состояния в установившемся режиме. Пусть заданное значение выхода объекта управления (уставка) САУ равно  $y^*(t)$ .

Коэффициент усиления объекта управления  $K_{\text{Об}}$  равен 5. То есть в установившемся режиме выполняется соотношение:

$$y^*(t) = K_{\text{Об}}(u^*(t) + f(t)) = 5(u^*(t) + f(t)).$$

Отсюда:

$$u^*(t) = V^*(t) = 0,2y^*(t) - x_4(t).$$

где  $u^*(t)$  и  $V^*(t)$  – желаемые значения сигналов  $u(t)$  и  $V(t)$  в установившемся режиме соответственно.

Возмущение  $f(t)$  – медленно изменяющаяся величина, которая оценивается наблюдателем в виде координаты  $x_4(t)$ .

В установившемся режиме координаты состояния объекта и исполнительного механизма должны иметь следующие значения:

- $x_1^*(t) = 0,2y^*(t)$ ;
- $x_2^*(t) = (x_1^*(t))' = 0$ ;
- $x_3^*(t) = (x_2^*(t))' = 0$ ;
- $x_5^*(t) = u^*(t) = 0,2y^*(t) - x_4(t)$ .

Управляющее воздействие  $V(t)$ , формируемое регулятором состояния, включает две составляющие  $V^*(t)$  и  $V_{ПЕР}(t)$ .  $V^*(t)$  обеспечивает поддержание выхода  $y(t) = y^*(t)$  в установившемся режиме.  $V_{ПЕР}(t)$  формирует реакцию регулятора на отклонение координат состояния  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ ,  $x_3(t)$  и  $x_5(t)$  от их значений  $x_1^*(t)$ ,  $x_2^*(t)$ ,  $x_3^*(t)$  и  $x_5^*(t)$  в желаемом установившемся режиме:

$$\begin{aligned} V_{ПЕР}(t) &= R_1(x_1^*(t) - x_1(t)) + R_2(x_2^*(t) - x_2(t)) + R_3(x_3^*(t) - x_3(t)) + R_4(x_5^*(t) - x_5(t)) = \\ &= R_1(0,2y^*(t) - x_1(t)) + R_2(-x_2(t)) + R_3(-x_3(t)) + R_4(0,2y^*(t) - x_4(t) - x_5(t)). \end{aligned}$$

где  $R_1, R_2, R_3, R_4$  – параметры настройки регулятора состояния.

Тогда текущее значение сигнала управления  $V(t)$ , формируемого регулятором состояния, можно вычислить по формуле:

$$\begin{aligned} V(t) &= V^*(t) + V_{ПЕР}(t) = 0,2y^*(t) - x_4(t) + R_1(0,2y^*(t) - x_1(t)) + R_2(-x_2(t)) + \\ &+ R_3(-x_3(t)) + R_4(0,2y^*(t) - x_4(t) - x_5(t)). \end{aligned}$$

### Моделирование переходных процессов САУ с регулятором состояния и альтернативной САУ на основе ПИД-регулятора

Коэффициенты  $R_1, R_2, R_3, R_4$  определялись в результате многократного моделирования переходных процессов в MATLAB SIMULINK [11] в режиме отработки ступенчатого задания  $y^*=100, f(t)=0$ . Получены следующие значения:  $R_1 = 20; R_2 = 65; R_3 = 20; R_4 = 6$ . Для сравнения качества работы регулятора состояния и альтернативного ПИД-регулятора параметры последнего настраивались в таком же режиме. При этом получена следующая передаточная функция регулятора:

$$W_{ПИД}(S) = 0,3344 + \frac{0,0229}{S} + \frac{1,0787S}{0,3S + 1}.$$

В настраиваемом режиме показатели качества переходных процессов практически совпадают: время переходного процесса  $t_p$  равно 15 минутам, перерегулирование  $\sigma$  равно нулю.

Для сравнения свойств САУ проведено исследование работы систем в различных режимах, представленных в табл. 1.

Таблица 1

#### Используемые режимы работы

Table 1

| Operating modes used |               |  |
|----------------------|---------------|--|
| Режим работы         | Задание $y^*$ | Возмущение $f(t)$                          |
| 1                    | 100           | 0  |
| 2                    | 0             | 10   |
| 3                    | 100           | с момента $t = 25$ мин. $f(t) = 0,5(t-25)$ |
| 4                    | 0             | $10\sin(0,05t)$                            |

На рисунке 3 представлены графики переходных процессов в различных режимах. Во всех режимах работа САУ начинается из нулевых начальных условий. Настройка параметров альтернативных регуляторов выполнялась в режиме 1 отработки ступенчатого изменения задания  $y^*=100$ . При этом желаемый переходный процесс – монотонный выход на задание за минимальное время.

В режиме 2 представлена отработка ступенчатого возмущающего воздействия  $f(t) = 10$  при неизменном задании  $y^*=0$ .

В режиме 3 САУ обрабатывали выход на задание  $y^*=100$ . При этом с момента  $t = 25$  мин. на вход объекта действует линейно нарастающее возмущение  $f(t) = 0,5(t-25)$ .

В режиме 4 представлена отработка альтернативными САУ гармонического возмущающего воздействия  $f(t) = 10\sin(0,05t)$  при неизменном задании  $y^*=0$ .

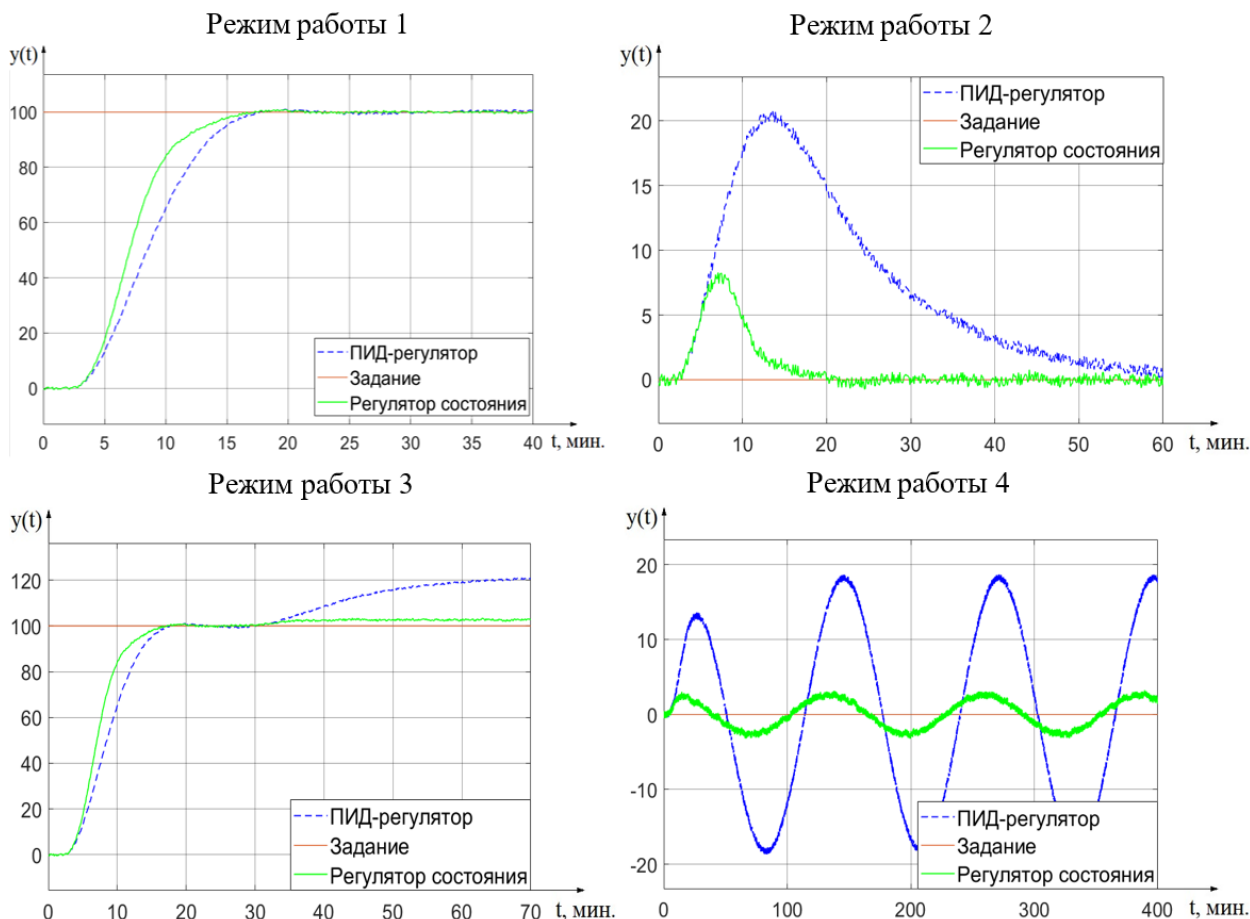


Рис. 3. Графики переходных процессов  
Fig. 3. Graphs of transients

В табл. 2 приведено сравнение качества работы систем управления с ПИД-регулятором и регулятором состояния (РС).

Таблица 2

Сравнение качества работы систем управления

Table 2

Comparison of the quality of control systems

| Режим работы | Время переходного процесса, мин. |    | Перерегулирование, % |    | Статическая ошибка, ед. |    | Максимальное отклонение выхода объекта от задания, ед. |    | Амплитуда колебаний выхода, ед. |    |
|--------------|----------------------------------|----|----------------------|----|-------------------------|----|--|----|---------------------------------|----|
|              | ПИД                              | РС | ПИД                  | РС | ПИД                     | РС | ПИД  | РС | ПИД                             | РС |
| 1            | 15                               | 15 | 0                    | 0  | 0                       | 0  | -  | -  | -                               | -  |
| 2            | 60                               | 18 | -                    | -  | 0                       | 0  | 21   | 8  | -                               | -  |
| 3            | 35                               | 10 | 0                    | 0  | 21                      | 3  | -  | -  | -                               | -  |
| 4            | -                                | -  | -                    | -  | -                       | -  | -  | -  | 18,5                            | 3  |

## Заключение

Результаты работы САУ с регулятором состояния и ПИД-регулятором в различных режимах, представленные на рис. 3 и в табл. 2 позволяют сделать следующие выводы:

– в режиме отработки ступенчатого изменения уставки  $y^*(t)$  при отсутствии возмущения  $f(t)$ , в котором выполнялись настройки параметров регуляторов каждой из рассматриваемых САУ, инженерные показатели качества регулирования практически совпадают;

– в режимах, требующих подавления различных вариантов не измеряемых возмущающих воздействий  $f(t)$ , разработанная САУ с регулятором состояния обеспечивала гораздо более высокие показатели качества регулирования.

### Список источников:

1. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005 V. 13. №4. pp. 559-576.

2. Ковриго Ю.М., Баган Т.Г., Бунке А.С. Обеспечение робастного управления в системах регулирования инерционных теплоэнергетических объектов // Теплоэнергетика. – 2014. – №. 3. – С. 9-14.

3. Анисимов А.А., Тарарыкин С.В., Аполлонский В.В. Параметрическая оптимизация электромеханических систем с регуляторами и наблюдателями состояния // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – №. 2. – С. 21-26.

4. Поleshchenko Д.А., Боровинских М.Д. Повышение эффективности работы шаровой мельницы путем совместного использования наблюдателя состояний и экстремального регулятора // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 11. – С. 55-72.

5. Анисимов А.А., Тарарыкин С.В. Синтез робастных систем управления мехатронными объектами с цифровыми регуляторами и наблюдателями состояния // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2020. – №. 6. – С. 39-47.

6. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Алгоритмическое обеспечение робастных асимптотических наблюдателей производных // Инженерный вестник Дона. – 2011. – Т. 16. – № 6. – С. 169-175.

7. Еременко И.Ф., Кривонос В.А. Система управления с наблюдателем координат состояния и неопределенного возмущения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – №. 7. – С. 10-13.

8. Тхан В.З., Дементьев Ю.Н., Гончаров В.И. Повышение точности расчета систем автоматического управления с запаздыванием // Программные продукты и системы. – 2018. – Т. 31. – №. 3. – С. 521-526.

9. Xueyan L., Zheng Y. Comparison of time delay processing methods in control system // 4th international conference on computer science and network technology. 2015. V. 1. pp. 1502-1505.

### References:

1. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID Control System Analysis, Design, and Technology. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005;13(4):559-576.

2. Kovrigo Yu.M., Bagan T.G., Bunke A.S. Securing Robust Control in Systems for Closed-Loop Control of Inertial Thermal Power Facilities. Thermal Engineering. 2014;3:9-14.

3. Anisimov A.A., Tararykin S.V., Apollonsky V.V. Parametric Optimization of Regulators and State Observers in Electromechanical Systems. Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University. 2016;2:21-26.

4. Poleshchenko D.A., Borovinskikh M.D. Increasing the Efficiency of a Ball Mill by Jointly Using a State Observer and an Extreme Controller. Engineering Journal of Don. 2022;11:55-72.

5. Anisimov A.A., Tararykin S.V. Synthesizing Robust Control Systems for Mechatronic Objects With Digital State Controllers and Observers. Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University. 2020;6:39-47.

6. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Algorithmic Support of Robust Asymptotic Observers of Derivatives. Engineering Journal of Don. 2011;16(6):169-175.

7. Eremenko I.F., Krivonosov V.A. Control System With the Observer of Condition Coordinates and Uncertain Disturbances. Instruments and Systems. Monitoring, Control, and Diagnostics. 2005;7:10-13.

8. Than V.Z., Demytyev Yu.N., Goncharov V.I. Increasing the Accuracy of Calculations of Automatic Control Systems With a Delay. Software and Systems. 2018;31(3):521-526.

9. Xueyan L, Zheng Y. Comparison of Time Delay Processing Methods in Control System. In: Proceedings of the 4th International Conference on Computer Science and Network Technology: 2015; vol. 1 p. 1502-1505.



10. Куок Д.В., Бобцов А.А. Адаптивный наблюдатель переменных состояния линейных нестационарных систем с параметрами, заданными не точно // Автоматика и телемеханика. – 2020. – №. 12. – С. 100-110.

11. Попадин А.Н. Автоматизированная настройка ПИД-регулятора для управления следящим приводом с использованием программного пакета MATLAB SIMULINK // Морской вестник. – 2019. – №. 3. – С. 93-96.

10. Quoc D.V., Bobtsov A.A. An Adaptive State Observer for Linear Time-Varying Systems With Inaccurate Parameters. Automation and Telemechanics. 2020;12:100-110.

11. Popadin A.N. Automated Tuning of a PID Controller for Monitoring a Servo Drive Using the MATLAB /Simulink Software Package. Morskoj Vestnik. 2019;3:93-96

#### **Информация об авторах:**

##### **Кривонос Владимир Алексеевич**

кандидат технических наук, доцент Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», <http://orcid.org/0009-0002-9615-2561>

##### **Корнев Артем Викторович**

студент магистратуры Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», <http://orcid.org/0000-0001-7252-7272>

#### **Information about the authors:**

##### **Krivosov Vladimir Alekseevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Sary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) of MISiS University of Science and Technology, <http://orcid.org/0009-0002-9615-2561>

##### **Korenev Artem Viktorovich**

Master's student at Sary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) of MISiS University of Science and Technology, <http://orcid.org/0000-0001-7252-7272>

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 07.12.2023; одобрена после рецензирования 17.01.2024; принята к публикации 14.02.2024.**

**The article was submitted 07.12.2023; approved after reviewing 17.01.2024; accepted for publication 14.02.2024.**

**Рецензент – Малаханов А.А., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.**

**Reviewer – Malakhanov A.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.**

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 658.512.22

doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-13-20

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

**Дмитрий Вячеславович Орехов**

ведущий инженер-конструктор ООО «Борокс Гидравлика», г. Брянск, Россия

odv2902@yandex.ru

**Аннотация.** Актуальность темы исследования обусловлена важностью инвестиционных затрат на технические решения для улучшения управления на промышленных предприятиях. За последние десятилетия установленная мощность металлорежущих станков увеличилась на порядок, что привело к еще более активному росту их производительности. Несмотря на это, производительность труда в целом возросла только в несколько раз. В такой ситуации целесообразно выбирать технологии, которые будут базироваться на точном выявлении целей и ожидаемых результатах, на основе учета производственно-технологических условий производства, предполагающих возможность использования как стоимостных, так и ресурсно-временных показателей производственного процесса. Целью статьи является оценка экономического эффекта от внедрения системы автоматизированного проектирования гидравлических станций на предприятиях, связанных с производством объемного гидропривода, разработка предложений по улучшению экономических и хозяйственных показателей работы этого производства. Инструментами достижения поставленной цели являются, в первую очередь, оперативность управления и снижение времени на проектирование оборудования, сокращение расходов на первоначальных этапах производства оборудования. Экономические результаты внедрения системы автоматизированного проектирования показывают эффективность предложенных решений.

**Ключевые слова:** САПР уникальных гидравлических станций, гидравлическая станция, объемный гидропривод, экономический эффект

**Для цитирования:** Орехов Д.В. Анализ эффективности автоматизации проектирования гидравлических станций // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №1 (23). С.13-20. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-13-20.

Original article

Open Access Article

## ANALYSING THE EFFECTIVENESS OF THE COMPUTER-AIDED DESIGN OF HYDRAULIC STATIONS

**Dmitry V. Orekhov**

Leading Design Engineer at «Borox Hydraulics LLC», Bryansk, Russia

odv2902@yandex.ru

**Abstract.** The relevance of the research is due to the importance of investment costs for technical solutions to improve industrial enterprises' management. Over the past decades, the installed capacity of metal-cutting machines has increased by an order of magnitude, which led to an even more active growth in their performance. Despite this, labour productivity as a whole has increased only several times. In such a situation, it is advisable to choose technologies that will be based on the precise identification of goals and expected results, grounded on considering production and technological conditions of manufacturing, assuming the possibility of using both cost and resource-time indicators of the production process. The aim of the article is to assess the economic effect of introducing a system of computer-aided design of hydraulic stations at enterprises related to producing volumetric hydraulic drive, to develop proposals to improve the economic and profitable performance of this production. The tools for achieving this goal are, first of all, management efficiency and time reduction for designing equipment, cost reduction at the initial stages of the equipment production. The economic results of introducing the computer-aided design system show the effectiveness of the proposed solutions.

**Keywords:** CAD of unique hydraulic stations, hydraulic station, volumetric hydraulic drive, economic effect

## Введение

Проектирование объемного гидропривода является сложной задачей, которая занимает большое количество времени и ориентирована на большой стаж инженера-конструктора и зачастую требует слаженной работы группы специалистов [1]. При проектировании объемного гидропривода используются системы автоматизированного проектирования (САПР), которые необходимы для создания трехмерных моделей и составления технической документации, остальная рутинная работа производится без использования автоматизированных систем, либо базируется на опыте проектировщика [2, 3]. Для достижения наилучших результатов работы предприятия, необходимо создание узкоспециализированных модулей, которые бы базировались уже на существующих системах автоматизированного проектирования, которые бы существенно облегчали и ускоряли работы проектировщиков, но данная процедура отнимает немало ресурсов у предприятия и поэтому необходимо правильно оценить ее значимость.

Необходимо отметить, что экономический эффект от внедрения средств автоматизации может быть косвенным, потому что непосредственно данные средства не являются главным источником дохода, а являются лишь вспомогательным инструментом для предприятия. Зачастую предприятия отказываются от готовых программных решений по причине, завышенных вложений. Руководство осознает, что внедрение информационных технологий является важной задачей, но не имея оценку выгоды зачастую отказывается от них.

На сегодняшний день, все больше предприятий заинтересовано в отечественных компонентах гидравлических систем. Данная задача является важной для многих отраслей деятельности. На рис. 1 представлена потребность предприятий специализированного машиностроения в гидравлических компонентах (млн. руб.) [4].



**Рис. 1. Потребность гидравлических компонентов**  
*Fig. 1. Requirement of hydraulic components*

Самым распространенным типом приводящих устройств является гидравлическая станция. Зачастую проектирование новой станции занимает большое количество времени и требует высокого уровня знаний специалиста в области производства объемного гидропривода. В современных условиях конкуренции и спроса, необходимо существенно сокращать цикл «заявка – готовое изделие», данным вопросом было решено заняться на предприятии, которое занимается производством объемного гидропривода. Проанализировав продукцию, выпускаемую данным предприятием, руководству было предложено решение по оптимизации проектирования гидравлических станций высокого и низкого давления.

## Постановка задач

Для достижения данной цели был поставлен ряд задач, которые включают в себя:

- определение области применения гидравлических станций;
- наложение определенных условий, в которых будет проводиться оптимизация гидравлической станции;
- разработка единого бланка технического задания (ТЗ), по которому будет вестись дальнейшая работа;
- определения связи между менеджментом, проектировщиком и производством;
- выявления необходимого количества поставщиков комплектующих;
- создание модулей для оптимизации процесса проектирования гидравлических станций и сокращения временных затрат на цикл «заявка – готовое изделие».

Область применения гидравлических станций настолько обширна, что охватить ее всю просто не представляется возможным. Необходимо выделить основные области применения и дать их краткое описание для дальнейшего понимания:

1. Дорожно-строительная техника. Экскаваторы, погрузчики, грейдера, бульдозеры, подъемные краны и т.д.
2. Сельскохозяйственная техника. Комбайны, сушилки, молотилки и т.д.
3. Переработка отходов. Прессов для мусора, шредеров, мусоровозов, стационарных и мобильных кран-манипуляторных установок с грейферными захватами.
4. Техника добычи полезных ископаемых. Машины для работы в шахтах, карьерах и горно-обогатительных комбинатах.
5. Производственное оборудование. Станции для подачи смазки, станочное оборудование и т.д.
6. Морская техника. Дноуглубительные суда, грузовые паромы, пассажирские крейсера, частные яхты, а также портовые машины оборудованы гидравлическими станциями с компонентами стойкими к жесткой морской среде. Гидропривод в морской технике имеет широкое применение: рулевые машины, приводы рампы, якорей, манипуляторов и подъемников.

Для перечисленных областей применения есть огромное количество условий, как эксплуатационных, так и технических. Для корректной работы в дальнейшем необходимо задать определенные ограничения, которые бы четко характеризовали тип и конструкцию гидравлической станции. Современные мощные вычислительные средства позволяют при решении математических моделей учитывать различные факторы, не рассмотренные ранее [5, 6].

### Ограничения на область работы

К основным параметрам гидравлической станции можно отнести: номинальное давление, номинальный расход, мощность приводного двигателя, одно- или много-поточность. Ограничения, которые были приняты в данной работе, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Ограничения для проработки гидравлических станций

Table 1

#### *Limitations for the development of hydraulic stations*

| Номинальное давление | Номинальный расход | Мощность приводного двигателя | Количество потоков |
|----------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|
| 1...700 bar          | 0,2...200 л/мин    | 0,25...50 кВт                 | до 2-х             |

Данные ограничения были сделаны с условием того что, 95 % выпускаемых предприятием гидравлических станций попадают в данные ограничения, а станции, которые не соответствуют данным критериям будут изготавливаться имеющимися средствами предприятия. На основании проработанных критериев был разработан единый бланк заказа гидравлической станции (рис. 2).



|   |  |                  |                 |                  |
|---|--|------------------|-----------------|------------------|
| 1.  | Название предприятия:  |                  |                 |                  |
| 1.1   | Контактное лицо:   |                  |                 |                  |
| 1.2   | Контактный телефон:  |                  |                 |                  |
| 2.  | Характеристики гидростанции  |                  |                 |                  |
| 2.1.  | Максимальное давление, развиваемое насосным агрегатом                                      |                  |                 | МПа              |
| 2.2.  | Максимальная производительность насосной установки   |                  |                 | л/мин            |
| 2.3.  | Требуемый объем бака (эффективная ёмкость)   |                  |                 | литр             |
| 2.4.  | Требуемая толщина фильтрации масла   |                  |                 | мкм              |
| 2.5.  | Какое масло планируется применять  |                  | вязкость        | сСт              |
| 3.  | Характеристики электродвигателя  |                  |                 |                  |
| заполняется в том случае, если станция должна поставяться без эл-дв или у заказчика есть особые требования к нему |  |                  |                 |                  |
| 3.1.  | Тип электродвигателя   | Постоянного тока |                 | Переменного тока |
| справа от выбранного поставить галочку  |  |                  |                 |                  |
| 3.2.  | Напряжение питания   |                  |                 | В                |
| 3.3.  | Частота вращения вала электродвигателя   |                  |                 | об/мин           |
| 3.4.  | Мощность электродвигателя  |                  |                 | кВт              |
| 3.5.  | Исполнение по монтажу  | фланец           | лапы            | комбинированное  |
| 3.6.  | Режим работы - продолжительный/кратковременный   |                  |                 |                  |
| 4.  | Дополнительные параметры   |                  |                 |                  |
| 4.1.  | Необходимость поставки шкафа управления (автоматизация технологического процесса) - да/нет |                  |                 |                  |
| 4.2.  | Кол-во гидро-лей   |                  | Схема гидро-лей |                  |
| 4.3.  | Дополнительное оборудование (Дроссель, клапан пропорциональный, реле давления и т.д.)      |                  |                 |                  |
| 4.4.  | Напряжение питания соленоидов клапанов   | 24DC             | 110AC           | 230AC            |
| 4.5.  | Необходимость поставки трубопроводов и/или РВД, их длина                                   |                  |                 |                  |
| 4.6.  | Наличие маслоохладителя  | воздушный        |                 | водяной          |
| 4.7.  | Наличие подогрева масла  | Нет              |                 | Да               |
| справа от выбранного поставить галочку  |  |                  |                 |                  |

Рис. 2. Бланк заказа гидравлической станции

Fig. 2. Hydraulic station order form

### Разработка модулей САПР

В дальнейшем при разработке модулей автоматизации проектирования необходимо руководствоваться входными данными, согласно бланка заказа (см. рис. 2). Согласно наиболее обобщенной модели системы – модели «черного ящика», система автоматизированного проектирования гидравлического оборудования представляет собой средство преобразования входной информации в выходную (рис. 3) [7].



Рис. 3. Обобщенная функциональная модель

Fig. 3. Generalized functional model

Входной информацией данного процесса является описание проектируемого объекта, которое содержится в техническом задании.

Выходная информация в соответствии с функциональным назначением системы определяет конструктивное описание проектируемого объекта, общепринятой формой представления которого является проектная и конструкторская документация, а в компьютерной форме – графические модели, текстовые документы, реляционная и графическая базы данных.

Для разработки системы автоматизированного проектирования гидравлического оборудования целесообразной является разработка структурно-функциональной схемы работы программы (рис. 4). С помощью данной схемы можно показать взаимодействие модулей разрабатываемого программного обеспечения.



Рис. 4. Структурно-функциональная схема САПР

Fig. 4. CAD structural and functional diagram

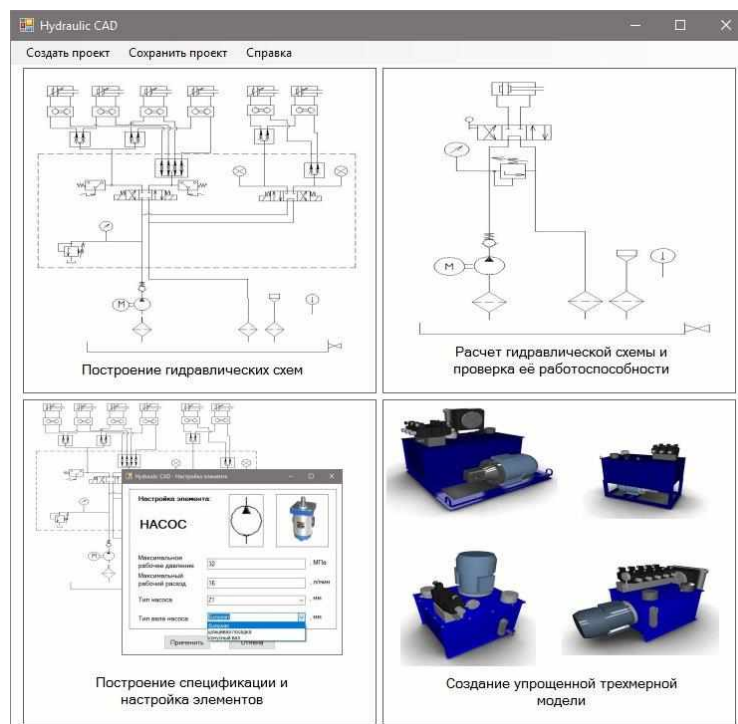
Все эти модули разрабатываются независимо друг от друга. Базы данных содержат исходные данные, параметры основных узлов гидравлической станции, правила построения параметрических моделей, сведения о вспомогательных элементах, правила формирования сборочных моделей, разработанные библиотеки элементов, различные константы и др.

### Применение разработанной САПР

Главным фактором, который влияет на задачу автоматизации проектирования, является количество проектных решений, которое будет выполнять предприятие, имея большое количество заказов можно говорить о необходимости автоматизации их исполнения. Поэтому необходимо на самом первом этапе, а это этап «Запроса КП», оперативно и грамотно предложить заказчику необходимое ему решение, учитывая такие показатели, как надежность, стоимость и срок поставки, а за это на предприятии отвечают менеджеры.

Организовав несколько запросов непосредственно с менеджерами по продажам гидравлики по всей России, можно с уверенностью сказать, что 8 из 10 из них не могут быстро и оперативно предложить необходимое решение для заказчика, потому что им приходится связываться с руководством, инженерами и т.д. Основываясь на полученных результатах, было принято решение разрабатывать программный модуль, который бы включал в себя 2 функции «Проектировщик – система» и «Менеджер – система».

Результатом проделанной работы стала система автоматизированного проектирования гидравлических станций «HydraulicsCAD» (рис. 5), которая была внедрена на нескольких предприятиях.



**Рис. 5. Интерфейс САПР «HydraulicsCAD»**  
**Fig. 5. CAD interface «HydraulicsCAD»**

Преимуществами разработанной системы являются простота интерфейса и возможности работы пользователей разного уровня подготовки. Результатом работы в систему будет являться: гидравлическая схема, трехмерная модель гидравлической станции, спецификация на гидравлическую станцию и данные расчета основных параметров гидравлического оборудования.

В конце 2019 года САПР «HydraulicsCAD» была внедрена на промышленном предприятии и зарекомендовала себя с лучшей стороны. Сегодня можно четко показать эффективность автоматизации производства на примере данного предприятия. Проанализируем несколько факторов, таких как время проектирования, количество выпускаемой продукции, количество заказчиков и один из самых главных показателей доходы от реализации. Сравнительный анализ проведем, начиная с 2019 года, у нас будут результаты до внедрения программы и включая 2022 год.

### **Эффект от внедрения САПР уникальных гидравлических станций**

Самым явным и быстро оценивающимся параметром будет являться время проектирования гидравлической станции. До внедрения САПР «HydraulicsCAD» конструктору необходимо было проделать ряд следующих действий, чтобы получить конечный результат:

1. Получена заявка на разработку.
2. Уточнение необходимых параметров.
3. Разработка принципиальной гидравлической схемы.
4. Согласование с заказчиком гидравлической схемы.
5. Подбор всех необходимых комплектующих.
6. Создание 3D-модели и подготовка технической документации.

Перечисленные этапы занимали в среднем от 10 до 16 часов работы конструктора, что не позволяло брать другие заявки. Теперь же данные этапы взяла на себя САПР «HydraulicsCAD», в которой менеджер в течение часа, а иногда и намного быстрее, если подобный проект уже был создан, может согласовать с заказчиком все моменты и передать

конструктору уже готовый комплект технической документации, который просто необходимо проверить и убедиться в его достоверности.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что время на проектирование сократилось в несколько раз, но данный показатель не может в полной мере показать эффективность автоматизации предприятия. Исходя из этого, нужно брать большое количество заказов, потому что есть свободное время, которое необходимо использовать для увеличения главного показателя эффективности – доход от реализации.

На рост дохода от реализации влияет много факторов, которые в совокупности можно свести к двум: количество выпускаемой продукции и количество контрагентов. В табл. 2 и 3 приведены данные показатели по годам.

Таблица 2

**Количество выпускаемых изделий**

Table 2

| <i>Number of products produced</i>         |      |      |      |       |
|--|------|------|------|-------|
| Год  | 2019 | 2020 | 2021 | 2022  |
| Количество, шт.                            | 734  | 1012 | 1186 | 2640  |
| Изменения                                  | -    | 37 % | 17 % | 122 % |
| <i>Изменения за 3 года составили 259 %</i> |      |      |      |       |

Таблица 3

**Количество контрагентов**

Table 3

| <i>Number of counterparties</i>            |      |      |      |      |
|--|------|------|------|------|
| Год  | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Количество, шт.                            | 12   | 23   | 24   | 32   |
| Изменения                                  | -    | 91 % | 4 %  | 33 % |
| <i>Изменения за 3 года составили 166 %</i> |      |      |      |      |

Исходя из данных показателей, можно сделать выводы об эффективности работы, как менеджмента, так и производства в целом. Освободившее время от проектирования пошло на пользу организации, и она сумела правильно им распорядиться и увеличить свои показатели. Также данные изменения коснулись не только выпускаемой продукции, но еще и одного немаловажного показателя – заработная плата рабочих, которая по некоторым должностям выросла на 87 % за период 2019...2022 года.

**Экономические показатели при использовании САПР «HydraulicsCAD»**

Согласно предоставленным данным все показатели растут, но необходимо понимать, как изменяется главный показатель предприятия – доход от реализации. Данные о реализации предприятия попадают под требования о неразглашении, поэтому для сравнения этого показателя примем условно первоначальный 2019 год за переменную  $N-1$  млн. руб., тогда сравнения по годам будет выглядеть следующим образом (табл. 4).

Таблица 4

**Доходы от реализации предприятия**

Table 4

| <i>Income from the sale of the enterprise</i> |      |      |      |      |
|---|------|------|------|------|
| Год   | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Млн. руб.                                     | 1    | 1,74 | 1,8  | 2,13 |
| Изменения                                     | -    | 74 % | 3%   | 18 % |
| <i>Изменения за 3 года составили 114 %</i>    |      |      |      |      |

Эффект от автоматизации только лишь одного направления работы предприятия впечатляет. Правильное распределение освободившего времени и координация на предприятии позволяет получить значимые результаты.



## Заключение

Выполненный в статье анализ эффективности применения разработанной САПР гидравлических станций «HydraulicsCAD» на промышленном предприятии, занимающимся производством объемного гидропривода, показал, что доходы от реализации предприятия выросли на 114 %, количество выпускаемых изделий увеличились на 259 %.

### Список источников:

1. Аверьянов О.И., Аверьянова И.О. Основы инжиниринга в машиностроении: учебное пособие, 2-е издание. – Москва: МГИУ, 2007. – 64 с.
2. Ревуцкий Л.Д. Потенциал и стоимость предприятия: учебное пособие. – Москва: Перспектива, 1997. – 124 с.
3. Халиков М.А. Моделирование производственной и инвестиционной стратегий машиностроительного предприятия: Монография. – Москва: Фирма Благовест-В, 2003. – 304 с.
4. Мальцев В.В. Гидравлика должна быть Российской // Вестник Гидравликов. – 2019. – №1. – С. 12-15.
5. Жданов А.В., Титова Н.В. Обоснование допущений приматематическом моделировании объемных гидроприводов с целью выбора методики их диагностирования // Машины и процессы в строительстве: Сборник научных трудов №6. – Омск: СибАДИ, 2007. – С. 157-160.
6. Титова Н.В. Разработка математической модели шестеренного гидронасоса как элемента системы автоматизированного проектирования диагностических комплексов // Сборник научных трудов / Иртышский филиал ФГОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта» (в г. Омске) – Омск, 2008. – № 6. – С. 160-163.
7. Иванова Г.С., Ничушкина Т.Н., Пугачев Е.К. Объектно-ориентированное программирование: учебное пособие. – Москва: Издательство МГТУ им. Баумана, 2001. – 320 с.

### Информация об авторах:

**Орехов Дмитрий Вячеславович**  
ведущий инженер-конструктор ООО «Борокс Гидравлика»

### References:

1. Averyanov O.I., Averyanova I.O. Fundamentals of Engineering in Machine-Building. 2nd ed. Moscow: Publishing House of Moscow State Industrial University; 2007.
2. Revutsky L.D. Potential and Cost of an Enterprise. Moscow: Perspective; 1997.
3. Khalikov M.A. Modelling Production and Investment Strategies of a Machine-Building Enterprise. Moscow: Firma Blagovest-V; 2003.
4. Maltsev V.V. Hydraulics Should Be Russian. Bulletin of Hydraulics. 2019;1:12-15.
5. Zhdanov A.V., Titova N.V. Justification of Assumptions in Mathematical Modelling of Volumetric Hydraulic Drives to Select a Methodology for Their Diagnosis. In: Proceedings on Machines and Processes in Building. Omsk: SibADI: 2007. vol. 6. p. 157-160.
6. Titova N.V. Development of a Mathematical Model of a Gear Hydraulic Pump as an Element of a Computer-Aided Design System for Diagnostic Complexes. In: Proceedings. Omsk: Irtysh Branch of Novosibirsk State Academy of Water Transport: 2008; vol. 6. p. 160-163.
7. Ivanova G.S., Nichushkina T.N., Pugachev E.K. Object-Oriented Programming. Moscow: Bauman Press; 2001.

### Information about the authors:

**Orekhov Dmitry Vyacheslavovich**  
Leading Design Engineer at «Borox Hydraulics LLC»

**Статья поступила в редакцию 11.02.2024; одобрена после рецензирования 28.02.2024; принята к публикации 03.03.2024.**

**The article was submitted 11.02.2024; approved after reviewing 28.02.2024; accepted for publication 03.03.2024.**

**Рецензент** – Пугачев А.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

**Reviewer** – Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

## Математическое и компьютерное моделирование

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 519.876.5

doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-21-32

### РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВР-СХЕМЫ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ АВТОМАТОВ И С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ КВАНТОВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Игорь Сергеевич Беляев<sup>1</sup>, Алексей Михайлович Петров<sup>2</sup>, Антон Николаевич Попов<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского, г. Норильск, Россия

<sup>3</sup> Государственный аграрный университет Северного Зауралья; Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

<sup>1</sup> belyaervis@norvuz.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9149-4357>

<sup>2</sup> darker2012@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3265-520X>

<sup>3</sup> 264241@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0774-411X>

**Аннотация.** Описывается концепция нового вида абстрактных автоматов «ВР-схема» (Business Process), эффективно распределяющих управленческие команды между сущностями при их перманентном росте в парадигме сложно моделируемых систем. Исследована предлагаемая модель реализации ВР-схемы, представляющая собой искусственную нейронную сеть, функционирование которой основано на правилах нечеткой логики с применением алгоритма Такаги-Сугено, для вывода правил в форме функциональных зависимостей. Модель использует QPU при вычислениях поведения системы, что предполагает быстрый отклик на изменения сущностей в системе. Исполненный с учетом выработанных правил нечеткой нейронной сети позволяет совершенствовать сценарии и прогностические модели поведения сложной системы.

**Ключевые слова:** моделирование систем, система управления, искусственная нейронная сеть, квантовые технологии, абстрактные автоматы, ВР-схема

**Для цитирования:** Беляев И.С., Петров А.М., Попов А.Н. Разработка модели ВР-схемы на основе теории автоматов и с применением методов квантового программирования // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №1 (23). С.21-32. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-21-32.

Original article

Open Access Article

### DEVELOPMENT OF A BP-SCHEME MODEL BASED ON THE AUTOMATA THEORY AND USING QUANTUM PROGRAMMING METHODS

Igor S. Belyaev<sup>1</sup>, Aleksey M. Petrov<sup>2</sup>, Anton N. Popov<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Fedorovsky Polar State University, Norilsk, Russia

<sup>3</sup> Northern Trans-Ural State Agricultural University; Tyumen State University, Tyumen, Russia

<sup>1</sup> belyaervis@norvuz.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9149-4357>

<sup>2</sup> darker2012@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3265-520X>

<sup>3</sup> 264241@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0774-411X>

**Abstract.** The paper describes the concept of a new type of abstract automata “BP-scheme” (Business Process) that effectively distributes management commands between entities with their permanent growth in the paradigm of complexly modelled systems. The paper investigates the proposed model of the BP-scheme implementation, which is an artificial neural network, functioning based on fuzzy logic rules using the Takagi-Sugeno algorithm, for deriving rules in the form of functional dependencies. The model uses QPU (Quantum Processing Unit) in computing system behaviour, which implies a quick response to changes in the system entities. QPU used taking into account the developed rules of

fuzzy neural network allows improving scenarios and predictive models of a complex system behaviour.

**Keywords:** system modelling, management system, artificial neural network, quantum technology, abstract automata, BP-scheme

**For citation:** Belyaev I.S., Petrov A.M., Popov A.N. Development of a BP-Scheme Model Based on the Automata Theory and Using Quantum Programming Methods. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 1 (23). pp. 21-32. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-21-32.

## Введение

Технические системы идут по пути усложнения, всего за несколько десятилетий был осуществлен переход от моно- к мульти (много) агентности. В виртуальной среде в эффективном тандеме друг с другом «работают» искусственные нейронные сети, в физическом мире разрабатываются и реализовываются концепции взаимодействия между собою таких сложных систем, как технологические линии, цеха и заводы. Причем, уже на этапе разработки закладываются возможности быстрой «перенастройки» подобных сложных систем с одного вида продукции на другой. Подобные вещи невозможно было сделать без возможности предварительного моделирования сложных систем [1, 2].

## Методики моделирования систем

Моделирование систем, как научная область, в настоящее время обладает разнообразным методическим инструментарием, на рис. 1 показана его базовая классификация.



**Рис. 1. Классификация методик моделирования систем**  
*Fig. 1. Classification of system modeling techniques*

Фундаментальный математический аппарат данной научной области, на прикладном уровне представлен следующими абстрактными схемами:

1. *D-схемы*, которые представляют собой непрерывно-детерминированные модели, отражающие моделируемую систему в динамике (ее изменение, в зависимости от не статичного параметра, которым в большинстве случаев является время).

2. *F-схемы*, которые реализовываются в виде математической абстракции конечного автомата со множеством регулируемых или учитываемых внутренних состояний, а также входных и выходных сигналов, которые в большинстве случаев представляются в виде конечного множества.

3. *P-схемы*, которые реализовываются в виде вероятностных автоматов, через дискретно-стохастический подход, что позволяет симитировать условный преобразователь информации с возможностью запоминания и, как следствие, корректировки последующей своей работы на основе предыдущего функционирования.

4. *Q-схемы*, являющиеся имитацией очерёдности элементов в целом и систем массового обслуживания в частности. При этом схема учитывает вероятность появления случайного

«возмущения» в случайный момент времени, т.е. реализуется возможность учета стохастического характера процесса.

5. *N-схемы*, имитирующие трудноформализуемые системы, т.к. учитывают описания структуры и взаимодействия параллельных систем и процессов, с возможностью запоминания и обучения причинно-следственных связей в них.

6. *A-схемы*, которые являются всевозможными комбинациями вышеперечисленных схем.

Прикладная реализация данных схем приводит к усовершенствованию текущих технологических процессов и, как следствие, приводит к снижению логистических издержек, затрат ресурсов, повышению точности управления и иных сопутствующих явлений. Однако даже подобные подходы со временем станут неэффективными, поскольку представляемые производством задачи опережают потенциальные возможности абстрактной схемы.

Чаще всего подобные схемы оцениваются/сравниваются по критерию оптимальности затрат ресурсов на создание управленческих команд. Логично, что чем больше связей между сущностями, тем больше ресурсов затрачивается на создание подобных сигналов. Это в свою очередь означает необходимость создания технологии, которая способна осуществлять минимальное создание управленческих команд при увеличении сущностей.

В связи с этим предлагается концепция нового вида абстрактных автоматов «BP-схема» (Business Process), эффективно распределяющих управленческие команды между сущностями при их перманентном росте в парадигме сложно моделируемых систем.

### Концептуальные особенности нового вида абстрактных автоматов

*Постановка задачи.* Описание и принцип действия BP-схемы рассматриваются применительно к сложной системе, которая состоит из  $n$ -сущностей, функционал которых заключается в реагировании на поступающие триггеры в диапазоне  $[0 \dots N]$  и изменения состояния (режима работы) в зависимости от значения триггера.

Входные данные:

– Сложная система в двумерном пространстве, состоящая из связанных друг с другом  $n$ -сущностей.

–  $n$ -сущности, каждая из которых может пребывать в состояниях  $[0 \dots N]$ .

– Триггеры  $n$ -сущностей в диапазоне  $[0 \dots N]$ .

Требуется: разработать концептуальную модель BP-схемы; описать принцип действия BP-схемы в виде конечного автомата; сформулировать критерий оптимальности; провести модельные эксперименты и оценить эффективность предложенных решений, по сравнению с другими видами конечных автоматов.

*Описание моделей и алгоритмов.* В соответствии с постановкой задачи система рассматривается как сложная, а значит она состоит из множества взаимодействующих друг с другом сущностей. Взаимодействие сущностей приводит к появлению и приобретению системой новых свойств, которые отсутствуют на локальном инфраструктурном уровне. Это означает, что динамику развития подобной системы сложно моделировать ввиду перманентного изменения зависимостей/отношений, между сущностями и, как следствие, появления таких свойств, как нелинейность, эмерджентность, спонтанный порядок, адаптация и петли обратной связи. При визуализации подобных систем их изображают в виде сети, где узлы представляют компоненты и связи между ними. Также необходимо учитывать, что ряд сущностей может получать триггеры параллельно или одна сущность может получать одновременно несколько управленческих команд.

Для описания информационного потока триггеров и управленческих команд определим интервал времени, между их взаимодействиями с сущностями системы. Интервал времени определяется, как:

$$T_S = t_s - t_{s-1}, \quad (1)$$

где  $T_S$  – интервал времени бездействия системы, между взаимодействиями с сущностями;  $t_s$  – интервал времени, затраченный на взаимодействие с текущей сущностью в системе;

$t_{s-1}$  – интервал времени, затраченный на взаимодействие с предыдущей сущностью в системе.

Логично, что данная формула расчетов будет адекватна при рассмотрении сущностей, которые находятся на одном маршруте информационного потока системы, иными словами, когда сущности системы линейно взаимосвязаны друг с другом. Это, в свою очередь, приводит к суждению о том, что сложную систему, состоящую из различных сущностей, взаимосвязь между которыми может вероятностно измениться в каждый момент времени, можно подвергнуть процедуре аппроксимации и представить ее в следующем виде:

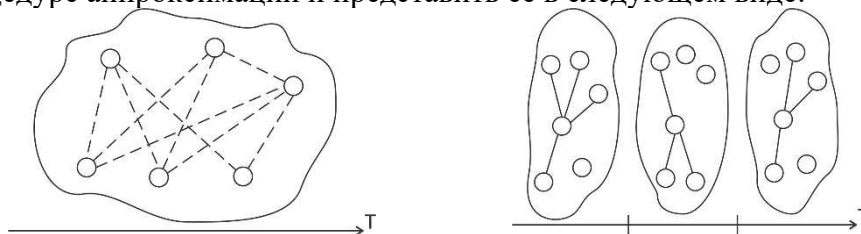


Рис. 2. Сложная система до аппроксимации (слева) и после (справа)  
 Fig. 2. Complex system before approximation (left) and after (right)

Подобное упрощение системы, а именно понимание какие сущности взаимодействуют друг с другом в каждый момент времени дает возможность расчета  $T_S$  для каждого графа, а следовательно, и возможность оценки интенсивности  $L_S$  по каждому его отрезку. Ввиду того, что информационные потоки нестационарные, их появления случайны, а рассматриваемые интервалы времени не равномерны, то процессы в системе могут быть охарактеризованы, как групповые потоки без последствия.

Учет вышеперечисленных моментов приводит к необходимости описать плотность распределения как:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(T_S) dt = B(t). \quad (2)$$

И через нее выводим интенсивность как:

$$L_S = \frac{1}{B(t)}. \quad (3)$$

Временной интервал взаимодействия триггеров и управленческих команд с сущностью в системе определяется интервалом времени от момента начала взаимодействия до его завершения. При моделировании подобной системы необходимо учитывать приоритетность подобных информационных потоков для сущности. Количество подобных взаимодействий может быть неограниченно. Сущности не могут взаимодействовать с одним информационным потоком группой, но каждая сущность может создать на основе триггера или управленческой команды ряд других триггеров или управленческих команд на другие сущности, в этом случае сущность переходит в иную позицию. Всего у сущностей может быть три позиции:

- 1) исполнитель – когда сущность принимает триггеры или управленческие команды;
- 2) заказчик – когда сущность направляет триггеры или управленческие команды;
- 3) исполнитель/заказчик – комбинация из двух вышеперечисленных.

В итоге получается следующая схема:

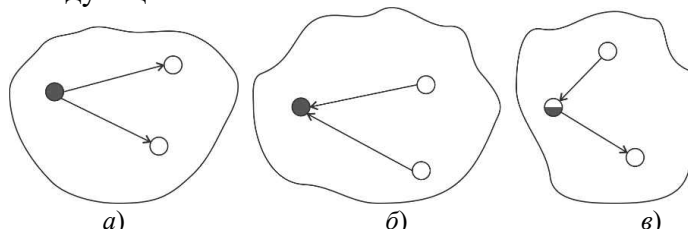


Рис. 3. Виды позиций сущностей в моделируемой системе:

*a* – сущность в позиции заказчик; *b* – сущность в позиции исполнитель; *в* – сущность в позиции исполнитель/заказчик

Fig. 3. Types of entity positions in the simulated system:

*a* – entity in the position customer; *b* – entity in the position of performer; *c* – entity in the position performer/customer

В данной системе информационный поток будет рассматриваться как однородный в связи с тем, что разный объем триггеров или управленческих команд, может быть обслужен

любой сущностью.

В связи со всем вышеизложенным, предложена следующая схема и временная диаграмма моделируемой системы (рис. 4).

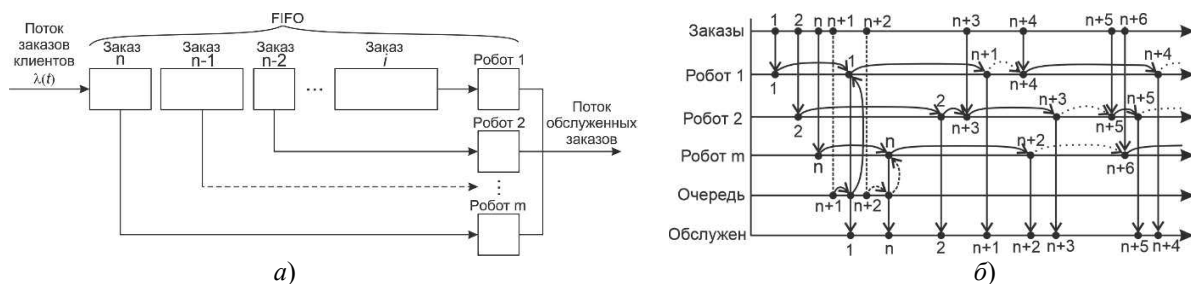


Рис. 4. Схема моделируемой системы (а) и временная диаграмма (б)  
 Fig. 4. Diagram of the simulated system (a) and the timing diagram (b)

В соответствии с временной диаграммой, представленной на рис. 4, приходящие на сущности триггеры или управленческие команды могут выполняться параллельно. В силу того, что триггеры или управленческие команды различаются по степени важности (ранжируются), то длительность взаимодействия с ними и их место в очереди для сущности может изменяться.

Таким образом, требуют решения следующие задачи:

- 1) разработать методику корректного ранжирования триггеров/управленческих команд;
- 2) определить алгоритм создания параллельных очередей триггеров/управленческих команд на одну сущность;
- 3) минимизировать время нахождения триггеров/управленческих команд в параллельных очередях на одну сущность;
- 4) создать процедуру определения позиции одной сущности относительно других.

Для оценки эффективности решения поставленных задач сформированы следующие критерии:

- 1) количество обрабатываемых одной сущностью триггеров/управленческих команд за определенный временной интервал;
- 2) максимальная длина очереди на одну сущность;
- 3) максимальное количество параллельных очередей на одну сущность;
- 4) равномерность распределения рангов триггеров/управленческих команд в очередях на одну сущность;
- 5) соотношение распределения состояний сущностей (исполнитель, заказчик, исполнитель/заказчик) внутри системы.

О пятом критерии поговорим подробнее, поскольку представляемая концепция нового вида автоматов «BP-схема», на прикладном уровне представляется авторами, как модель экономической системы взаимодействия друг с другом организаций-игроков, то необходимо обозначит следующее:

– При перенасыщении системы сущностями, прибывающими в состоянии «исполнитель» и «исполнитель/заказчик» система становится негативно нестабильной.

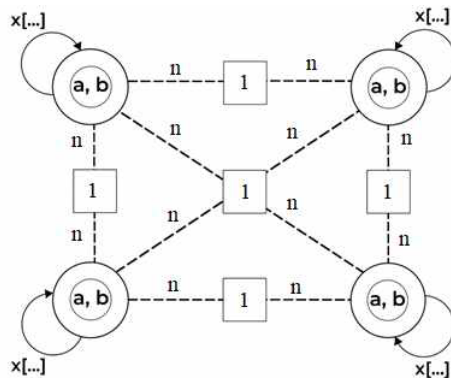
– При перенасыщении системы сущностями, прибывающими в состоянии «заказчик» система становится стабильно развивающейся.

В соответствии с вышеизложенными теоретическими положениями предлагается следующая формальная модель:

$$BP = \langle L_S, X, Y, Z, D, R, T \rangle, \quad (4)$$

где  $X = \{s_{1...3}, \tau\}$ ;  $s_{1...3}$  – одно из трех состояний, в котором пребывает сущность;  $\tau$  – приблизительная оценка времени пребывания сущности в данном состоянии;  $Y$  – объем триггеров/управленческих команд на сущности в дискретный момент времени  $t$ ;  $Z$  – длина очереди на одну сущность;  $D$  – количество параллельных очередей на одну сущность;  $R$  – правила назначения триггеров/управленческих команд на сущность;  $T$  – время работы сущности с триггерами/управленческими командами.

Опираясь на разработанную модель системы (1) мы можем представить ВР-схему в виде графа (рис. 5).



**Рис. 5. Граф автомата ВР-схемы:**

$a, b$  – внутренние состояния;  $x$  – условия перехода;  $n$  – триггеров/управленческих команд;  $1$  – оракул

**Fig. 5. The graph of the BP scheme automaton:**

$a, b$  – internal states;  $x$  – transition conditions;  $n$  – triggers/control commands;  $1$  – oracle

Если указанные выше элементы легенды графа классически, либо интуитивно понятны, «оракул» является уникальным для описания элементом. Естественно, необходимо объяснить данный инструмент, который является ключевым, для функционирования ВР-схемы.

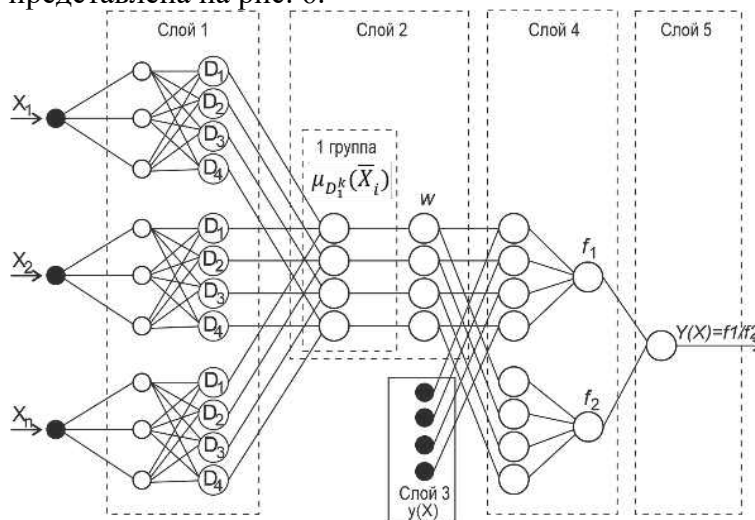
«Оракул» ВР-схемы представляет собой искусственную нейронную сеть, функционирование которой основано на правилах нечеткой логики. Приходящие на «оракул» информационные потоки в виде триггеров/управленческих команд могут быть выражены в виде цифрового сигнала и формировать динамическую базу данных для обучения нейронной сети и выработки уникальных правил для каждой ситуации.

Нечёткая нейронная сеть (ННС) «оракула» для аппроксимации входящих данных по информационному потоку использует алгоритм Такаги-Сугено для вывода правил в форме функциональных зависимостей:

$$R^{(k)}: \text{если } (x_1 \text{ есть } D_1^k \text{ И } \dots \text{ И } x_N \text{ есть } D_N^k), \text{ то } y = f^{(k)}(x_1 \dots x_n), \quad (5)$$

где  $R^{(k)}$  – условное нечеткое правило во множестве нечетких правил по признакам  $(k_1 \dots k_n)$ ;  $D_1^k$  – нечёткие множества во множестве нечетких правил;  $x_1 \dots x_n$  – входные переменные.

Структура ННС представлена на рис. 6.



**Рис. 6. Структура ННС «оракула»:**

$\mu_{D_1^k}$  – обобщенное линейризованное представление проявления признака нечёткого множества во множестве нечетких правил;  $y$  – выходное значение;  $f_{1..n}$  – аппроксимирующий элемент;  $w$  – весовой коэффициент

**Fig. 6. The structure of a neural network «oracle»:**

$\mu_{D_1^k}$  – generalized linearized representation of the manifestation of a fuzzy set feature in a set of fuzzy rules;  $y$  – output value;  $f_{1..n}$  – approximating element;  $w$  – weight coefficient



Функциональные особенности каждого слоя ННС следующие:

1. Распределение входных данных по потокам триггеров/управленческих команд, их преобразование в нечёткие переменные и параллельное сравнение с имеющимися данными.
2. Определение метрик истинности для правил, уже имеющихся в базе данных.
3. Обучение ННС, результатом которого является выражение входных данных в виде одной объединенной функции принадлежности.
4. Составление списка выработанных правил.
5. Переход от функции принадлежности к ее измеряемому значению.

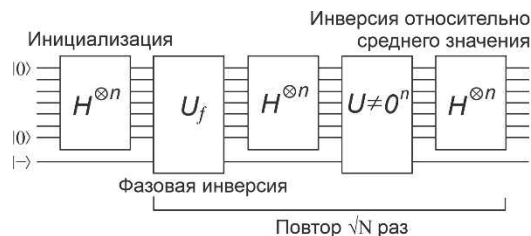
Итогом работы ННС является сценарий распределения потоков триггеров/управленческих команд на сущности, входящие в систему для поддержки корректного соотношения состояний сущности с целью сохранения системы в режиме стабильно развивающейся.

Как можно заключить, «оракул» является ключевым элементом ВР-схемы и описание алгоритма его работы, а также последующее моделирование является превалирующим для логики данной работы.

Поведение сложной системы, которую ВР-схема должна поддерживать в стабильно развивающемся состоянии функционирует в логике, что плотность потока триггеров/управленческих команд зависит от степени свободы сущности. Таким образом  $L_S$  является приоритетным элементом формальной модели и, как следствие, именно на него ориентируется «оракул» при составлении сценария, чтобы уменьшить плотность потока триггеров/управленческих команд на одну сущность и сократить время их выполнения.

Ввиду того, что триггеры/управленческие команды между сущностями должны распределяться в порядке параллельных очередей и не выстраиваться в одну последовательную очередь, то классические алгоритмы теории массового обслуживания в данном случае будут не эффективны. Поэтому для сохранения высоких метрик  $L_S$  логично будет использовать квантовый алгоритм Гровера, чаще всего использующийся для решения задачи перебора с целью поиска данных [3 – 8].

Обобщённая схема данного алгоритма представлена на рис. 7.



**Рис. 7. Обобщенная форма алгоритма Гровера для произвольного числа кубитов**  
**Fig. 7. The generalized form of Grover's algorithm for an arbitrary number of qubits**

При поступлении потока триггеров/«управленческих импульсов» в систему, «оракулу» необходимо осуществить расчет  $L_S$  и направить поток на ту сущность, где значение данного параметра будет минимальным. Предположим, что подобный поток будет состоять из  $k$  триггеров и  $n$  «управленческих импульсов».

В подобной постановке задачи оценка «оракулом» критерия  $L_S$  можно представить как:

$$L_S = \frac{1}{B(t)} \sum_{\{0 \dots k\}_n} (t_{L_S} + t_p + t_s), \quad (6)$$

где  $t_{L_S}$  – время направления потока на сущность;  $t_p$  – длительность выполнения сущностью операции по триггеру;  $t_s$  – длительность выполнения сущностью операции по формированию управленческой команды.

Аппроксимируем сложное пространство сущностей до уровня отрезка-взаимодействия между двумя сущностями. Подробно рассмотрим одно взаимодействие между двумя сущностями с потоком триггеров/управленческих команд. Как можно понять существуют следующие сценарии:

- 1) одна сущность в позиции «заказчик», другая в позиции «исполнитель»;

- 2) одна сущность в позиции «заказчик/исполнитель», другая в позиции «исполнитель»;
- 3) обе сущности в позиции «заказчик/исполнитель».

Поэтому на уровне полноценной системы, которая состоит из подобных отрезков-взаимодействий, возникает задача нахождения оптимального пути для информационного потока триггеров/управленческих команд от одной сущности к другой через ряд произвольных сущностей, пока информационный поток не будет исполнен.

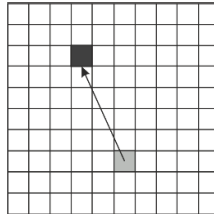
Логично, что подобную задачу можно рассмотреть, как поисковую задачу на графе, а именно:

$$G = (V, E), \quad (7)$$

где  $E$  – множество ребер;  $V$  – множество вершин.

Сложную систему взаимодействия сущностей, можно выразить в виде сетки и, как следствие, в виде графа, где его ребра – это сущности, а маршруты информационных потоков между ними – это вершины. Отсюда следует, что для рассмотрения каждого маршрута информационного потока необходимо найти некую последовательность ребер графа. Очевидно, что существует  $m$  маршрутов от стартовой до финальной сущности и чем дальше они будут находиться друг от друга, тем больше данных маршрутов может быть.

Рассмотрим процедуру поиска оптимального маршрута из  $m$  маршрутов с использованием инструментов и терминов комбинаторики. Систему и пролагаемый по ней маршрут информационного потока от стартовой сущности до финальной представлена на рис. 8.



**Рис. 8. Сложная система в виде пространства графа**  
*Fig. 8. Complex system represented as a graph space*

В этом случае стартовая позиция информационного потока (стартовая сущность, которая создаёт поток) и его конечная позиция (финальная сущность, которая поток выполняет) обязательны, а значит могут быть выражены, как  $m_s \in M$  и  $m_f \in M$  соответственно, где  $M$  – комбинация произвольно взятых элементов. Рассмотрев рис. 8, можно умозаключить, что наиболее оптимальным является тот маршрут, при прохождении по которому от  $m_s$  до  $m_f$  все элементы  $M$  задействованы только по одному разу.

Примем, что мощность  $E$  равна  $z$ , тогда выражение  $k + n = z!$  будет описывать общее количество всех возможных упорядоченных взаимодействий.

Учитывая, что маршрут от стартовой сущности к конечной по пространству графа может быть длительным, но не бесконечным (т.к. количество сущностей ограничено и маршрут не может проходить более одного раза по одной сущности), то для поиска наиболее короткого маршрута информационного потока триггеров/управленческих команд необходимо:

- 1) найти все возможные комбинации упорядоченных установок без повторений;
- 2) вычислить возможную длину информационного потока от стартовой до конечной сущности;
- 3) разработать инструмент выбора маршрута с наименьшим количеством сущностей в промежутки от стартовой до конечной.

Наименьший маршрут находится по формуле:

$$l_{\min sE} = \min \{l_{sE1}, l_{sE2} \dots l_{sEn}\}, \quad (8)$$

где  $sE$  – позиция стартовой сущности.

Отсюда следует, что с помощью данного выражения можно осуществить нахождение наименьшего маршрута, превратив выражение (8) в систему уравнений:

$$\begin{cases} l_{\min sE1} = \min\{l_{sE11}, l_{sE12} \dots l_{sE1n}\} \\ l_{\min sE2} = \min\{l_{sE21}, l_{sE22} \dots l_{sE2n}\} \\ \dots \\ l_{\min sEn} = \min\{l_{sEn1}, l_{sEn2} \dots l_{sEnn}\} \end{cases} \quad (9)$$

Затем выразить в матричном виде и учесть величину  $L_S$ , для каждого маршрута:

$$\begin{pmatrix} l_{sE11} & \dots & l_{sE1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{sEn1} & \dots & l_{sEnn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_{s1} \\ \dots \\ L_{sn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{s1} \\ \dots \\ M_{sn} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Итоги расчета (10) покажут, что одна из величин больше других и, как следствие, имеет больший маршрут/сроки выполнения сущностей триггера/управленческой команды.

Алгоритм распределения информационного потока представляется в виде следующей последовательности:

1. Ожидание триггера/управленческой команды. Если действие получено, то осуществляется переход на следующий этап.
2. Сущностью выполняется, либо не выполняется условие перехода  $x$ , ввиду чего внутреннее состояние сущности меняется на  $a$  или  $b$ . Если действие осуществлено, то происходит переход на следующий этап.
3. Оракулом производится расчет  $M_{sn}$ .
4. Производится выбор наиболее короткого маршрута.
5. Происходит перерасчет режима системы. Если обнаружены отклонения от стабильно развивающегося режима, то «оракул» производит процедуру корректировки состояний сущностей.
6. Осуществляется вывод правил в форме функциональных зависимостей и информация по ним поступает на «оракула»
7. После выполнения триггера/управленческой команды неактивные сущности переходят в режим ожидания.

Во время работы «оракулом» используется квантовый алгоритм Гровера (для сохранения высоких метрик  $L_S$ ) [9 – 13]. Подобный алгоритм уже реализован в [14], что существенно упрощает реализацию ВР-схемы на квантовом компьютере и позволяет перейти к экспериментальным исследованиям.

### Результаты экспериментов

Для моделирования работы ВР-схемы разработана программа для QPU (Quantum Processor Unit). Схематичное изображение модели, выраженное с помощью QPU представлено на рис. 9.

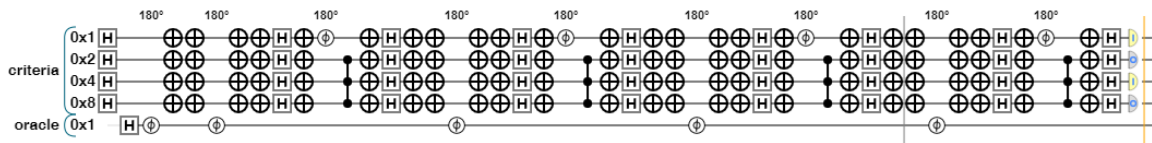


Рис. 9. ВР-схема, выраженная с помощью средств QPU  
Fig. 9. BP scheme expressed using QPU means

Моделировался процесс поиска (с помощью алгоритма Гровера) нахождения определённой (наиболее приоритетной) сущности, которая бы удовлетворяла вышеописанным критериям в неструктурированном пространстве сложной системы (неструктурированной базе данных).

Алгоритм работы данной модели выглядит следующим образом:

1. Инициализация кубитов: вначале появления триггера/управленческой команды, инициализируется пять кубитов, четыре из которых хранят информацию о критериях, по которым происходит поиск, а оставшийся – используется как «оракул» для фазового сдвига.

2. Переход кубитов в состояние «суперпозиции»: все кубиты критериев и оракула переводятся в суперпозицию с помощью преобразования Адамара. Кубит «оракула» также получает дополнительный фазовый сдвиг на 180 градусов ( $\pi$ -радиан), что меняет его фазу на противоположную.

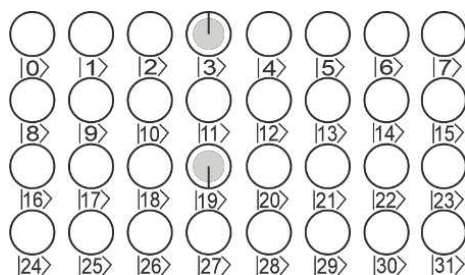
3. Работа «оракула»: «оракул» производит изменение фазы состояния кубитов, отвечающих за критерии потока триггера/«управленческого импульса» с наивысшим приоритетом. При программировании данного алгоритма, оракул идентифицирует состояние  $|1101\rangle$  как наиболее приоритетное и прикладывает к нему фазовый сдвиг.

4. Работа оператора диффузии: данный оператор усиливает вероятность измерения состояния, фаза которого была инвертирована оракулом, и уменьшает вероятность всех остальных. Это достигается путем преобразования Адамара, применения операции NOT ко всем кубитам, применения фазового сдвига и повторения преобразования Адамара и операции NOT.

5. Выполнение алгоритма Гровера: поисковый алгоритм повторяет комбинацию применения оракула и оператора диффузии, а именно  $\sqrt{N}$ , где  $N$  это количество возможных состояний. Соответственно, с учётом примера в четыре кубита это будет  $\sqrt{2^4}$ .

6. Измерение: после выполнения необходимого числа итераций алгоритма, кубиты измеряются для получения конечного результата.

7. Вывод результата: измеренное значение показывает состояние с наивысшим приоритетом. Результат измерения выводится в консоль. В двоичном виде это будет представлять собой сочетание критериев, которое «оракул» определил, как приоритетное (рис. 10).



**Рис. 10. Визуализация работы BP-схема, по определению оптимальной сущности**  
*Fig. 10. Visualization of the BP-scheme operation, defining the optimal entity*

На данной визуализации мы видим, что изменились состояния кубитов №3 и №19. Это означает, что данные кубиты находятся в равной суперпозиции (это видно по площади заполнения круга) состояний  $|00\rangle|00\rangle$  и  $|11\rangle|11\rangle$ . Положение стрелок на данных кубитах указывает сдвиг на  $0^0$  и  $180^0$  соответственно. В контексте алгоритма Гровера, стрелка вниз указывает на кубиты, чья фаза была инвертирована оракулом — это соответствует маркировке правильного ответа. В данном случае это означает, что кубиты №3 и №19 помечены, как соответствующие условию поиска. В результате выполнения алгоритма получено число «11», это означает, что после измерения кубиты критериев находились в состоянии, которое соответствует двоичному представлению числа 3 (в двоичной системе «11» равно десятичному числу 3). Это означает, что некий третий условный элемент списка/сценария, по которому должна перестроиться BP-схема, как имитационная модель сложной системы является приоритетным, согласно правилам ННС, на основе которых выведены критерии для «оракула».

## Заключение

Представленная в данной работе BP-схема может быть использована при имитационном моделировании сложных систем в области экономики или гибкого производства. Предлагаемое решение отличается использованием QPU в вычислениях поведения системы, а значит быстрым откликом на изменения состояния сущностей в системе. Помимо этого, использование поискового алгоритма Гровера с учетом выработанных правил ННС позволяет

совершенствовать сценарии и прогностические модели поведения сложной системы. В перспективе авторы научного коллектива планируют исследовать поведение «оракула» ВР-схем в сложных системах и определить дальнейшие способы его совершенствования.

#### Список источников:

1. Петров А.М., Попов А.Н. Разработка метода математического моделирования термодинамических процессов однофазных потоков наружных сетей теплоснабжения // *Строительство и техногенная безопасность*. – 2022. – № 26(78). – С. 59-63.
2. Петров А.М., Попов А.Н. Разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений по оценке состояния объектов системы теплоснабжения // *Автоматизация и информатизация ТЭК*. – 2023. – № 6(599). – С. 15-21.
3. Markov L., Saeedi M. Constant-optimized quantum circuits for modular multiplication and exponentiation. *Quantum Information and Computation* 12, 0361-0394, 2012.
4. Ambainis A. A nearly optimal discrete query quantum algorithm for evaluating NAND formulas, 2017.
5. Маслов И.О., Бачило А.О., Черкесова Л.В. Повышение быстродействия квантового алгоритма Гровера путем применения инверсии вокруг среднего // *Молодой исследователь Дона*. – 2019. – № 2(17). – С. 35-41.
6. Ulyanov S., Reshetnikov A., Tyatyushkina O. Modelling of Grover's quantum search algorithms: implementations of simple quantum simulators on classical computers // *Системный анализ в науке и образовании*. – 2020. – № 3. – С. 65-128.
7. A Fixed-Phase Quantum Search Algorithm with More Flexible Behavior / X Li et al. // *J. of Quantum Information Science*. – 2012. – No 2. – Pp. 28-34.
8. Johansson N., Larsson J.A. Quantum simulation logic, oracles, and the quantum advantage // *Entropy*. – 2019. – Vol. 21, No. 8.
9. Оценка возможностей классических компьютеров при реализации симуляторов квантовых алгоритмов / С. В. Ульянов, Н. В. Рябов, П. В. Зрелов и др. // *Программные продукты и системы*. – 2022. – № 4. – С. 618-630.
10. Quantum Simulators: Architectures and Opportunities / E. Altman, I. Siddiqi, K. R. Brown et al. // *PRX Quantum*. – 2021. – Vol. 2, No. 1. – P. 017003.
11. Quantum Computer Systems for Scientific Discovery / Y. Alexeev, D. Bacon, K. R. Brown et al. // *PRX Quantum*. – 2021. – Vol. 2, No. 1. – P. 017001.
12. Gyongyosi L., Imre S. Circuit Depth Reduction for Gate-Model Quantum Computers // *Scientific Reports*. – 2020. – Vol. 10, No. 1. – P. 11229.
13. A Modified Quantum Search Algorithm / H. Mehri-Dehnavi, H. Dashtianeh, H. Ya. Kuchaksaraei et al. // *International Journal of Theoretical Physics*. – 2018. – Vol. 57, No. 12. – P. 3668-3681.
14. Химено-Сеговиа М., Хэриган Н., Джонстон Э. Программирование квантовых компьютеров. Базовые алгоритмы и примеры кода. – СПб.: Питер, 2021. – 336 с.

#### References:

1. Petrov A.M., Popov A.N. Development of a Method for Mathematical Modelling of Thermodynamic Processes of Single-Phase Flows of External Heat Supply Networks. *Construction and Industrial Safety*. 2022;26(78):59-63.
2. Petrov A.M., Popov A.N. Development of a Decision-Making Intelligent Support System for Assessing the State of the Heat Supply System Facilities. *Automation and Informatization of the Fuel and Energy Complex*. 2023;6(599):15-21.
3. Markov L., Saeedi M. Constant-Optimized Quantum Circuits for Modular Multiplication and Expansion. *Quantum Information and Computation*. 2012;12:0361-0394.
4. Ambainis A. A Nearly Optimal Discrete Query Quantum Algorithm for Evaluating NAND Formulas; 2017.
5. Maslov I.O., Bachilo A.O., Cherkesova L.V. Speed Improvement of Quantum Grover's Algorithm Through the Use of Inversion About the Mean. *Young Don Researcher*. 2019;2(17):35-41.
6. Ulyanov S., Reshetnikov A., Tyatyushkina O. Modelling of Grover's Quantum Search Algorithms: Implementations of Simple Quantum Simulators on Classical Computers. *System Analysis in Science and Education*. 2020;3:65-128.
7. X Li, et al. A Fixed-Phase Quantum Search Algorithm With More Flexible Behaviour. *J. of Quantum Information Science*. 2012;2:28-34.
8. Johansson N., Larsson J.A. Quantum Simulation Logic, Oracles, and the Quantum Advantage. *Entropy*. 2019;21:8.
9. Ulyanov SV, Ryabov NV, Zrelov PV, et al. Evaluating the Capabilities of Classical Computers in Implementing Quantum Algorithm Simulators. *Software and Systems*. 2022;4:618-630.
10. Altman E, Siddiqi I, Brown KR, et al. Quantum Simulators: Architectures and Opportunities. *PRX Quantum*. 2021;2(1):017003.
11. Alexeev Y, Bacon D, Brown KR, et al. Quantum Computer Systems for Scientific Discovery. *PRX Quantum*. 2021;2(1):017001.
12. Gyongyosi L., Imre S. Circuit Depth Reduction for Gate-Model Quantum Computers. *Scientific Reports*. 2020;10(1):11229.
13. Mehri-Dehnavi H, Dashtianeh H, Kuchaksaraei HYa, et al. A Modified Quantum Search Algorithm. *International Journal of Theoretical Physics*. 2018;57(12):3668-3681.
14. Gimeno-Segovia M., Harrigan N., Johnston E. Programming Quantum Computers. Essential Algorithms and Code Samples. St. Petersburg: Peter; 2021.

### **Информация об авторах:**

#### **Беляев Игорь Сергеевич**

кандидат экономических наук, доцент, зав. кафедрой информационных систем и технологий «Заполярного государственного университета им. Н.М. Федоровского», <http://orcid.org/0000-0001-9149-4357>.

#### **Петров Алексей Михайлович**

Кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой электроэнергетики и автоматизации «Заполярного государственного университета им. Н.М. Федоровского», <http://orcid.org/0000-0002-3265-520X>.

#### **Попов Антон Николаевич**

старший преподаватель академического департамента индивидуальных образовательных траекторий ТюмГУ, старший преподаватель кафедры Энергообеспечения сельского хозяйства ГАУ Северного Зауралья, <http://orcid.org/0000-0003-0774-411X>.

### **Information about the authors:**

#### **Belyaev Igor Sergeevich**

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Department “Information Systems and Technologies” of Fedorovsky Polar State University, <http://orcid.org/0000-0001-9149-4357>.

#### **Petrov Alexey Mikhailovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department “Electric Power and Automation” of Fedorovsky Polar State University, <http://orcid.org/0000-0002-3265-520X>.

#### **Popov Anton Nikolaevich**

Senior lecturer of the academic department of individual educational trajectories of Tyumen State University, senior lecturer of the Department “Energy Supply of Agriculture” of the Northern Trans-Ural State Agricultural University, <http://orcid.org/0000-0003-0774-411X>.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 13.01.2024; одобрена после рецензирования 03.02.2024; принята к публикации 14.02.2024.**

**The article was submitted 13.01.2024; approved after reviewing 03.02.2024; accepted for publication 14.02.2024.**

**Рецензент** – Горбунов А.Н., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

**Reviewer** – Gorbunov A.N., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 658.5:004.9

doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-33-41

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ПРЕДПРИЯТИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМООТНОШЕНИЯМИ С КЛИЕНТАМИ

Анна Владимировна Быкова<sup>1✉</sup>, Александр Юрьевич Бекмешов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук, г. Москва, Россия

<sup>1</sup> balabolik@mail.ru

**Аннотация.** Актуальным вопросом автоматизации и цифровизации процессов производственного предприятия является внедрение автоматизированной системы управления взаимоотношениями с клиентами – CRM-системы (Client Relationship Management System) в структуру функционирующего предприятия. Этап глубокой проработки бизнес-процессов предприятия, построение структуры бизнес-процессов и моделирование будущей системы позволяет значительно сократить сроки внедрения автоматизированной системы, наглядно оценить соответствие поставленной задачи и будущей системы, реализовать эффективное внедрения CRM-системы на производственном предприятии. На этапе предварительного анализа решаются вопросы идентификации основных сущностей системы и определение уровня их взаимодействия. Целью исследования является описание методики построения концептуальной модели CRM-системы на примере проведения исследований структуры бизнес-процессов предприятия и дальнейшая формализация результатов подготовительных работ для последующего эффективного внедрения CRM-системы. Основными методами исследования являются теоретический анализ, формализация и методы построения информационных моделей. Новизна работы заключается в исследовании малоизученных аспектов предварительного анализа при внедрении CRM-систем, выявлении закономерностей описания типовых непроизводственных процессов и их формализация для функционирующего производственного предприятия. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании архитектуры, программировании и настройке CRM-системы на предприятии в области машиностроения и других видов производств.

**Ключевые слова:** автоматизация, цифровизация, CRM-система, бизнес-процесс, моделирование, производство, продукт

**Для цитирования:** Быкова А.В., Бекмешов А.Ю. Формализация бизнес-процессов предприятия при моделировании автоматизированной системы управления взаимоотношениями с клиентами // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №1 (23). С.33-41. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-33-41.

Original article

Open Access Article

## FORMALIZING ENTERPRISE'S BUSINESS PROCESSES WHEN MODELLING AN AUTOMATED CUSTOMER RELATIONSHIP MANAGEMENT SYSTEM

Anna V. Bykova<sup>1✉</sup>, Alexander Yu. Bekmeshov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>1</sup> balabolik@mail.ru

**Abstract.** A pressing issue of automation and digitalization of processes in a manufacturing enterprise is the introduction of an automated customer relationship management system, namely a CRM system (Client Relationship Management System) into the structure of a functioning enterprise. The stage of in-depth study of the enterprise's business processes, building the structure of business processes and modelling the future system allow one to significantly reduce the implementation time of the automated system, to clearly assess the compliance of the task and the future system, and to fulfil the effective implementation of a CRM system at a manufacturing enterprise. At the preliminary analysis stage,



*the issues of identifying the main entities of the system and determining the level of their interaction are resolved. The aim of the study is to describe the methodology for constructing a conceptual model of a CRM system using the example of conducting research on the structure of the enterprise's business processes and further formalizing the results of preparatory work for the subsequent effective implementation of a CRM system. The main research methods are theoretical analysis, formalization and methods for constructing information models. The novelty of the work lies in examining poorly-studied aspects of the preliminary analysis when implementing CRM systems, identifying patterns in the description of typical non-production processes and their formalization for a functioning manufacturing enterprise. The study results can be used in designing the architecture, programming and setting up a CRM system at an enterprise in the field of mechanical engineering and other types of production.*

**Keywords:** automation, digitalization, CRM system, business process, modelling, production, product

**For citation:** Bykova A.V., Bekmeshov A.Yu. Formalizing Enterprise's Business Processes When Modelling an Automated Customer Relationship Management System. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 1 (23). pp. 33-41. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-33-41.

## Введение

По оценкам отечественных ученых в области развития цифровой экономики, «производительность труда в России в 3,5...4 раза ниже, чем в развитых странах». «Решение данного фундаментального вопроса многие ученые видят в том, чтобы делать упор на развитие среды, способствующей генерации инноваций, и, в частности, на развитие человеческого капитала, а также активно имплементировать цифровые технологии в реальный сектор» [1]. В результатах проведенных исследований основной упор рекомендуется делать на промышленный сектор, как наиболее востребованный в России в период применения международно-правовых мер по ограничению использования продукции зарубежных производителей [1].

Актуальным вопросом автоматизации и цифровизации процессов производственного предприятия является внедрение автоматизированной системы управления взаимоотношениями с клиентами – CRM-системы (Client Relationship Management System) в структуру функционирующего предприятия [2]. Решение о разработке собственной автоматизированной системы или выбор подходящего «коробочного» решения должно приниматься по результатам глубокого предварительного анализа бизнес-процессов предприятия, построения и анализа структуры бизнес-процессов предприятия и подробного сравнительного анализа существующего многообразия программных решений в этой области.

Целью работы является описание методики построения концептуальной модели CRM-системы на примере проведения исследований структуры бизнес-процессов предприятия и формализации результатов подготовительных работ для последующего эффективного внедрения CRM-системы. При целостной предварительной проработке поставленной задачи и анализе действующей структуры предприятия, непосредственное внедрение «коробочного» решения CRM-системы сводится к настройке выбранного программного средства под задачи предприятия. От качества и глубины проведенной аналитической работы зависят и сроки внедрения будущей системы, которые могут сократиться от 1...2 лет до 1...2 месяцев для среднего предприятия.

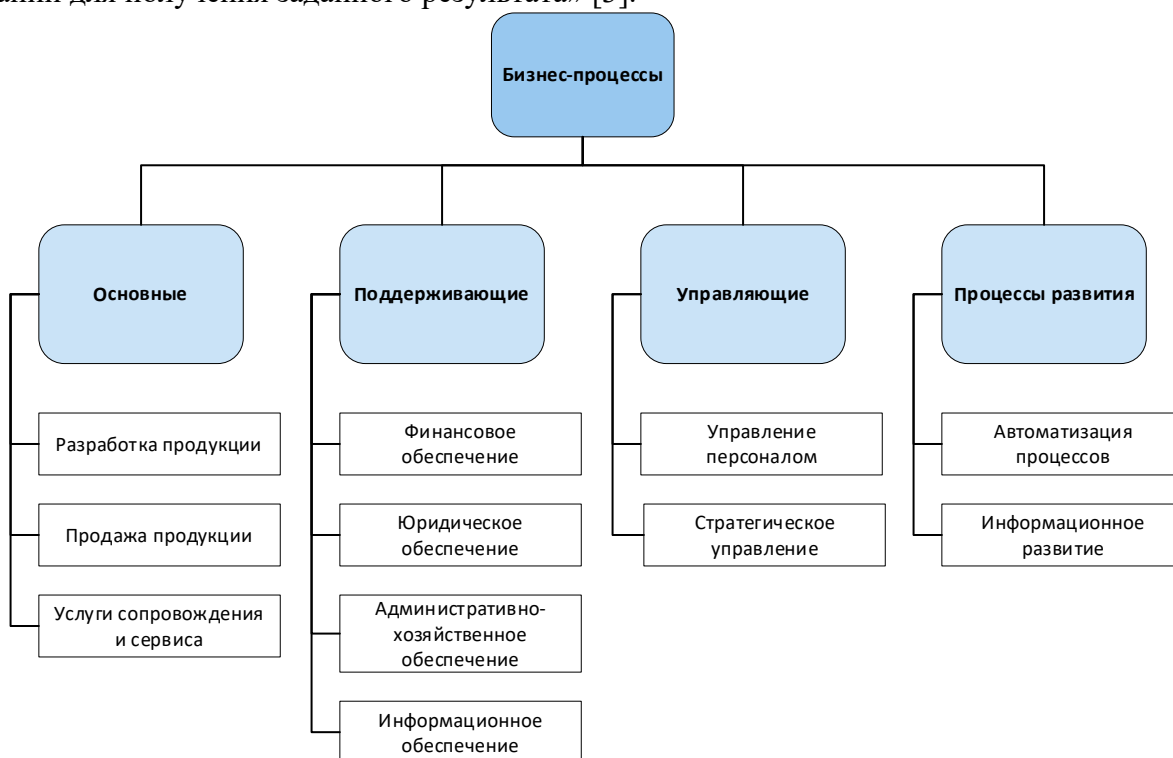
## Материалы и методы исследования

Задачи предварительного анализа при внедрении CRM-системы включают в себя: изучение предприятия в целом; формализацию основных бизнес-процессов с учетом особенностей производства; построение логической модели CRM-системы; анализ актуальных CRM-систем и подбор оптимального решения; разработку архитектуры системы, применительно к особенностям существующей инфраструктуры предприятия; построение структуры базы данных CRM-системы. Далее будут рассмотрены первые этапы предварительного анализа предприятия с целью дальнейшего внедрения CRM-системы.

Исследуемое предприятие занимается разработкой программного обеспечения для распространения на территории РФ и ближайшего зарубежья. В услуги компании входит разработка, продажа, поставка, внедрение и сопровождение программного продукта собственной разработки. Компания имеет ряд партнеров и крупных клиентов. Все отношения

с клиентами и партнерами происходят в рамках подписанных договоров, регламентирующих условия продажи продукции и уровень обслуживания. Все взаимодействие с клиентами предприятия должны отслеживаться в CRM-системе, а все действия с клиентами должны соответствовать сущностям системы.

Для изучения деятельности предприятия и выявления ее особенностей обозначим общую структуру всех бизнес-процессов предприятия, представленную на рис. 1. «Бизнес-процесс – это стандартная последовательность (цепочка) действий, которая многократно выполняется в компании для получения заданного результата» [3].



**Рис. 1. Дерево бизнес-процессов предприятия**  
*Fig. 1. The tree of business processes at an enterprise*

На представленном рисунке проведена классификация бизнес-процессов компании и выделены следующие классы бизнес-процессов, характерные для производственного предприятия [4]:

1 класс – основные бизнес-процессы – процессы, основной задачей которых является непосредственная разработка продукции и получение прибыли от продажи продукции предприятия и предоставления услуг сопровождения и сервиса. «Условно можно сказать, что каждый из них – это «отдельное» направление бизнеса» [3].

2 класс – поддерживающие бизнес-процессы – процессы, направленные на обеспечение жизнедеятельности основных процессов предприятия.

3 класс – управляющие бизнес-процессы – процессы, затрагивающие все процессы предприятия, с точки зрения их управления и контроля.

4 класс – процессы развития – процессы, направленные на усовершенствование бизнес-процессов предприятия, эксплуатируемого оборудования и выпускаемой продукции предприятия. «Основная задача процессов совершенствования – сделать развитие бизнеса системным и непрерывным» [3].

Задачам оптимизации и автоматизации основных производственных процессов предприятия, таких как непосредственная разработка продукции (проектирование, конструирование, производство), посвящено большое количество исследований, а руководством предприятий на интуитивном уровне уделяется первостепенное внимание и проводится регулярный контроль этих процессов. В качестве одной из задач бизнес-процессов перспективного развития предприятия стоит автоматизация основных НЕ производственных

бизнес-процессов компании, таких как продажа продукции и предоставление услуг сопровождения и сервиса, путем внедрения на предприятии системы управления взаимоотношениями с клиентами – CRM-системы.

Процессы взаимодействия с клиентами и предоставления услуг сопровождения и сервиса напрямую влияют на удовлетворенность клиентов. Находясь в зоне высокой удовлетворенности клиент наиболее лоялен к предприятию и приобретаемой продукции и, как следствие, просматривается прямая зависимость влияния удовлетворенности клиента на долгосрочность отношений с ним [4]. В рамках жесткой конкуренции большое значение имеет качественный уровень обслуживания и сервиса продукции предприятия. «Во избежание проблем в будущем требуются главным образом постоянство цели и приверженность улучшению конкурентных позиций, чтобы сохранить жизнеспособность компании и обеспечить рабочие места сотрудникам» [5]. CRM-система – как один из способов цифровизации бизнес-процессов, которая при должной отладке нацелена на повышение заинтересованности клиентов в выпускаемой продукции, повышение уровня удовлетворенности клиентов, улучшение внутренних условий труда сотрудников и уровня взаимодействия внутри предприятия и внешнего взаимодействия с клиентами, а также механизма принятия решений на предприятии [6].

Выполним детальный анализ бизнес-процесса продажи продукции, на примере которого выявим закономерности построения и формализации бизнес-процесса и обозначим методы оптимизации непроизводственных бизнес-процессов компании. Бизнес-процесс продажи продукции инициирует первоначальное взаимодействие с клиентами. Проведем декомпозицию бизнес-процесса продажи продукции на следующие подпроцессы, которые будут отслеживаться в проектируемой CRM-системе: заключение договора, подготовка сопроводительных документов (применительно к рассматриваемому предприятию, это выпуск лицензии и ключа аппаратной защиты), передача продукта клиенту. Рассматривая предприятия производства узкопрофильной продукции, например, специализированного программного обеспечения, продукции машиностроительного производства и других, можно выявить закономерность в отсутствии подпроцесса привлечения клиентов путем массовых рассылок, обзвонov, таргетированной рекламы, который может быть развит на других предприятиях массового производства товаров широкого потребления. Применительно к рассматриваемому предприятию данную функцию выполняют управляющие подразделения предприятия в подпроцессе стратегического управления. В основе отношений с клиентами таких производств лежит долгосрочность и доверительность отношений.

Все договора с клиентами являются в системе сущностями – «Контракт на продажу продукции». Для производственного предприятия большое значение имеет разбиение существующих договоров по типам:

- Лицензионный договор. Договор купли-продажи основного вида продукции предприятия.
- Договор Гарантийного сопровождения. Договор вступает в силу после даты его подписания и действует на протяжении установленного гарантийного срока.
- Договор Постгарантийного сопровождения. Договор может быть заключен после истечения срока гарантийного сопровождения и по условиям договора не имеет ограничений по количеству обращений в службу сопровождения/сервисную службу предприятия;
- Абонементное сопровождение. Договор может быть заключен после истечения срока гарантийного сопровождения и по условиям договора есть ограничения по количеству обращений в службу сопровождения/сервисную службу предприятия.

Для договоров Гарантийного и Постгарантийного обслуживания существует понятие «Повременное обслуживание», т.е. для договоров данного типа может быть установлен срок действия договора или общее количество часов/дней, затраченных на обслуживание. Такое разграничение оправдано в случае почасовой оплаты за услуги сопровождения/сервисного обслуживания.

На основании зарегистрированных в системе действующих Контрактов должно

производиться обслуживание клиентов предприятия.

Услуги сопровождения обеспечиваются первой и второй линиями поддержки. Первая линия поддержки предполагает непосредственную коммуникацию с клиентами по средствам телефонного общения и через электронную почту. Вторая линия поддержки не занимается непосредственным общением с клиентами и участвует в разборе и тестирование внештатных ситуаций, требующих детального разбора с целью устранения дефектов и повышении качества продукции. По результатам обзора профильной литературы, одной из эффективных практик взаимодействия с клиентами является принцип работы через «ситуационных менеджеров – единственный контакт со внешней средой». «Ситуационный менеджер, действующий в качестве буфера между все еще сложным процессом и клиентом, ведет себя с последним так, как будто он отвечает за осуществление всего процесса, хотя на самом деле это не так» [7]. Такие сотрудники оказывают консультативные услуги клиентам по эффективному внедрению продукции, ее наладке, настройке и запуску в эксплуатацию, а также продолжают взаимодействовать с клиентами на протяжении всего периода эксплуатации продукции по вопросам сопровождения и сервиса.

Так как CRM-системы потенциально могут охватывать все основные и поддерживающие процессы предприятия по продаже и сопровождению сделки, предоставлению услуг, дальнейшей постпродажной работе с клиентами, а также частично финансовое и юридическое обеспечение, то имеет смысл применить принцип декомпозиции и рассматривать отдельно только основные бизнес-процессы компании, требующие автоматизации. CRM-системы нельзя рассматривать только как механизм автоматизации, необходимо предусмотреть «как мы можем использовать новые технологические возможности для повышения эффективности либо рационализации, либо усовершенствования того, что мы уже делаем» [7].

### Результаты исследования

В статье зафиксированы результаты исследования основного вида деятельности предприятия по продаже продукции, установлены закономерности описания типовых непроизводственных процессов предприятия, выявлены ключевые особенности для дальнейшего внедрения системы управления взаимоотношениями с клиентами, зафиксированы главные сущности проектируемой системы и их взаимосвязи. Детализированы основные непроизводственные бизнес-процессы предприятия, требующие автоматизации и построены наглядные логические модели подпроцессов будущей системы. «Описание процесса на верхнем (логическом) уровне – это его принципиальная схема» [3].

На рис. 2 представлена общая верхнеуровневая структура процесса на примере подпроцесса продажи продукции предприятия.

Первым этапом процесса продажи продукции является подписание договора с клиентской организацией, который менеджер договорного отдела обязан зарегистрировать в системе. Заведенный в системе контракт является основанием для оформления заказов (спецификаций), продажи и дальнейшего сопровождения продукции.

Заказ (спецификация) представляет условия продажи конкретной продукции: расценки, наименование продаваемых компонентов или узлов, тип заказа (продажа услуг, продажа продукции, продажа отдельных компонентов продукции или лицензии).



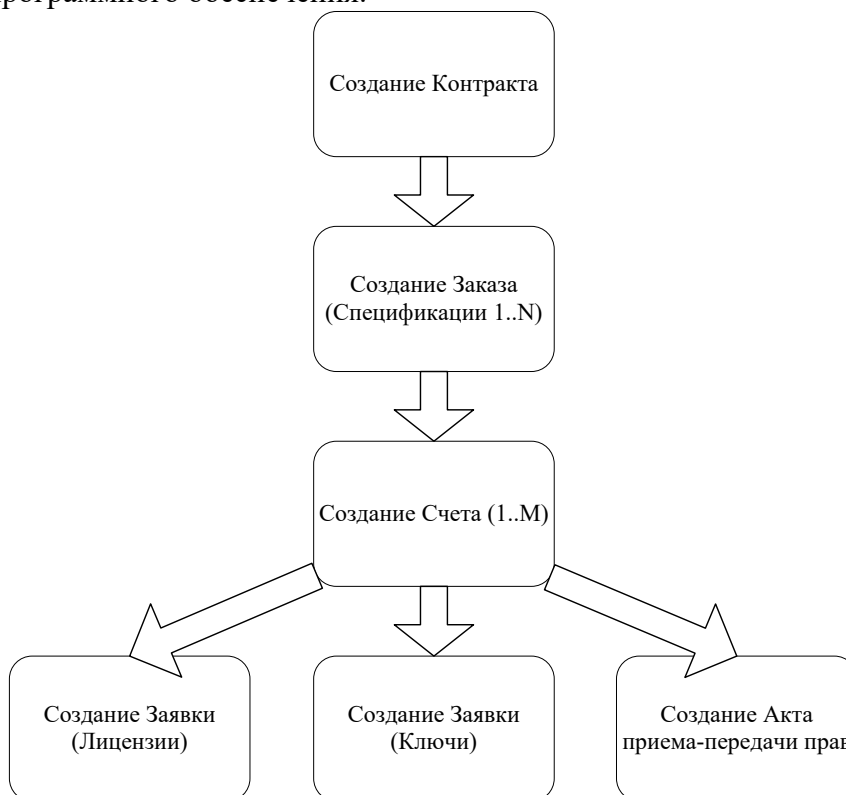
Рис. 2. Бизнес-процесс продажи продукции  
Fig. 2. The business process of selling products

Менеджеру по заказам необходимо создать в системе Заказ (спецификацию) с соответствующими параметрами заказа. Данная спецификация должна быть связана с контрактом, по которому происходит продажа. Количество заказов (спецификаций) по одному контракту может быть неограниченное.

Завершающим этапом оформления продажи продукции является обязательное создание счета. Счет может дублировать информацию заказа (спецификации) или по одному заказу (спецификации) может быть выписано несколько счетов, например если продажа и поставка продукции по данному заказу (спецификации) происходит в несколько партий. В этом случае, общая сумма Заказа (Спецификации) автоматически будет складываться из всех выписанных счетов.

При продаже непосредственно продукции предприятия, процесс продажи дополняется этапами непосредственной поставки и передачи продукции. Для производственного предприятия данные этапы могут включать: оформление акта приема-передачи; создание заявок на отгрузку со склада; заказ транспорта; оформление пропусков на транспорт; оформление доверенности на доставку; оформление накладных; выезд сервисного инженера для установки и настройки оборудования и так далее.

На рис. 3 представлен полный бизнес-процесс продажи продукции производственного предприятия, с уточнениями применимыми к рассматриваемому предприятию по производству программного обеспечения.



**Рис. 1. Бизнес-процесс обработки входящего запроса о покупке продукции**  
*Fig. 3. The business process of processing an incoming purchase request*

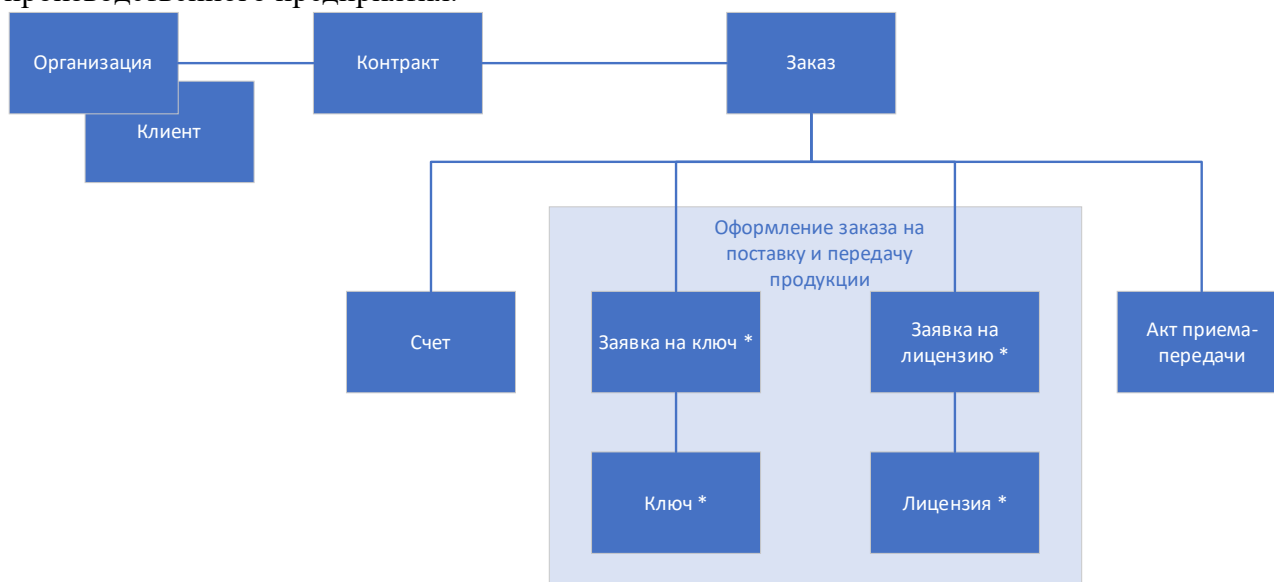
Каждый выявленный подпроцесс рассматриваемого бизнес-процесса предприятия влияет на модель будущей системы и представляет собой одну из сущностей CRM-системы.

После регистрации контракта, создания заказа и выписки счета на приобретение продукции необходимо создать заявки на поставку и передачу продукции.

Система управления взаимоотношениями с клиентами является сложной системой и существует на стыке различных бизнес-процессов компании. Моделирование будущей системы позволит сузить рассматриваемую проблему и акцентировать внимание в каждый момент на отдельном ее аспекте. «Моделирование позволяет решить четыре различные задачи:

- 1) визуализировать систему в ее текущем или желательном для нас состоянии;
- 2) описать структуру или поведение системы;
- 3) получить шаблон, позволяющий сконструировать систему;
- 4) документировать принимаемые решения, используя полученные модели» [8].

Далее на рис. 4 представлена построенная концептуальная модель будущей системы для текущего бизнес-процесса продажи продукции, на примере рассматриваемого предприятия по производству специализированного программного обеспечения. Концептуальная модель описывает основные сущности проектируемой системы и их взаимосвязи для бизнес-процесса обработки входящего запроса о покупке продукции, актуального для любого производственного предприятия.



\* Специализированные сущности для предприятия по производству программного обеспечения

**Рис. 4. Концептуальная модель CRM-системы для бизнес-процесса обработки входящего запроса о покупке продукции производственного предприятия**

**Fig. 4. The concept model of a CRM system for the business process of processing an incoming purchase request at an enterprise**

Компании, планирующие внедрение CRM-системы на производстве, зачастую стараются переложить этап анализа бизнес-процессов предприятия и построение модели будущей системы на ИТ-подразделения предприятия (системных администраторов, программистов и пр.) или вовсе воспользоваться услугами сторонних интеграторов. Но на успешность внедрения системы и полезный эффект от ее внедрения влияет в большей степени эффективность, наглядность и качество реализованных бизнес-процессов предприятия. Поэтому первоначальной задачей при внедрении CRM-системы стоит собственная глубокая предварительная проработка требований, описание и оптимизация бизнес-процессов предприятия изнутри, на основе которого можно выполнить моделирование будущей системы и наглядно убедиться в удовлетворенности будущей системой. Проведенный анализ позволяет выявить закономерности при формализации бизнес-процессов предприятия, по результатам которых построить типовую модель CRM-системы производственного предприятия для одного из непроизводственных бизнес-процессов – процесса обработки входящего запроса о покупке продукции.

Предварительная проработка и оптимизации бизнес-процессов предприятия является ключевым фактором успешности внедрения автоматизированной системы управления взаимоотношениями с клиентами и позволяет «подготовить «почву» для их автоматизации» [9]. Неподготовленность предприятия к будущим изменениям на уровне автоматизации процессов может повлечь дополнительные угрозы на пути внедрения системы и в конечном итоге привести к дополнительным неоправданным тратам предприятия и неудовлетворенности ожиданиям от внедрения CRM-системы.

## Заключение

Статья основывается на методах теоретического анализа, абстрагирования, индукции и дедукции, формализации и методах построения информационных моделей. В данном исследовании была проанализирована область внедрения системы, специфические особенности и малоизученные аспекты предварительного анализа при внедрении CRM-систем на производственном предприятии. Методика предварительного изучения предприятия, формализации бизнес-процессов и их последовательной декомпозиции представлена на примере одного из основных непроизводственных бизнес-процессов предприятия, требующего автоматизации – бизнес-процесса продажи продукции. Подобным образом можно выполнить комплексное моделирование остальных бизнес-процессов предприятия, которое ляжет в основу архитектуры будущей системы и будет использовано при программировании и настройке CRM-системы на предприятии.

### Список источников:

1. Управление устойчивым развитием промышленности в условиях цифровизации / Андреев В.Н., Баранов В.В. и др. / Монография. Москва: Янус-К, 2022. – 119 с.
2. Быкова А.В., Капитанов А.В. Принципы взаимодействия автоматизированной системы взаимоотношений с клиентами и АС предприятия на различных этапах жизненного цикла продукции // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2023. – №1 (64) – с. 15-21.
3. Рыбаков М. Бизнес-процессы: как их описать, отладить и внедрить. – М.: Издательство Михаила Рыбакова, 2016. – 392 с.
4. Роджер Бест. Маркетинг от потребителя. – Манн, Иванов и Фербер. – 2017. – 696 с.
5. Репин В., Елиферов В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2013. – 544 с.
6. Деминг Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. – 419 с.
7. Кораблёв О.В., Золотухина Е.Б. Методология внедрения CRM-системы на предприятии // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4.
8. Хаммер М., Чампи Дж. Реинжиниринг корпорации. Манифест революции в бизнесе. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2011. – 288с.
9. Буч Г., Рамбо Д., Якобсон И. Язык UML. Руководство пользователя. 2-е изд.: Пер. с англ. Мухин Н. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 496 с.
10. Автоматизация бизнес-процессов компаний в соответствии с концепцией CRM: коллективная монография / Подповетная Ю.В., Переверзев П.П. и др. / под. ред. Е.В. Буновой. – М.: Перо, 2017. – 134 с.

### Библиографический список:

1. Методика проектирования автоматизированных систем управления производственными и технологическими процессами на основе uml-профиля для систем реального времени marte / Баев А.В., Самонов А.В. и др. // Системы автоматизации проектирования. – 2023. – №3 (73). – С. 55-69.

### References:

1. Andreev V.N., Baranov V.V., et al. Management of Sustainable Development of the Enterprise in the Condition of Digitalization. Moscow: Janus-K; 2022.
2. Bykova A.V., Kapitanov A.V. Interaction Between Customer Relationship Management System and Automated Enterprise Systems on the Various Stages of the Product Life Cycle. Vestnik MSTU “STANKIN”. 2023;1(64):15-21.
3. Rybakov M. Business Processes: How to Describe Them, Debug and Implement Them. Moscow: Mikhail Rybakov Publishing House; 2016.
4. Roger Best. Marketing From the Consumer. Mann, Ivanov and Ferber; 2017.
5. Repin V., Eliferov V. Process Approach to Management. Modelling of Business Processes. Moscow: Mann, Ivanov and Ferber; 2013.
6. Deming E. Out of the Crisis: A New Paradigm for Managing People, Systems and Processes. Moscow: Alpina Business Books; 2009.
7. Korablev O.V., Zolotukhina E.B. CRM-System Implementation Methodology in the Enterprise. Modern Problems of Science and Education. 2013;4.
8. Hammer M., Champi J. Reengineering the Corporation. A Manifesto for Business Revolution. Moscow: Mann, Ivanov and Ferber; 2011.
9. Buch G., Rambo D., Jacobson I. UML Language. User Guide. 2nd ed. Mukhin N, translator. Moscow: DMK Press; 2006.
10. Podpovetnaya Yu.V., Pereverzev P.P. Automation of Business Processes of Companies in Accordance With the CRM Concept. Bunova EV, editor. Moscow: Pero; 2017.

### Bibliographic list:

1. Baev AV, Samonov AV, et al. Methodology of Designing Automated Control Systems for Production and Technological Processes Based on the UML-Profile for Real-Time Marte Systems. Computer Aided Systems. 2023;3(73):55-69.



2. Быкова А.В., Карлова Т.В. Выявление оптимальных параметров для оценки эффективности внедрения на предприятии системы управления взаимоотношениями с клиентами // Качество. Инновации. Образование. – 2023. – №3 (185). – С. 25-33.

3. Губернаторов О.Н. Оценка показателей качества технических средств автоматизированных систем управления // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2022. – №4 (18). – С. 12-17.

4. Соломенцев Ю.М., Павлов В.В. Моделирование производительных систем в машиностроении. – М.: Янус-К. – 2010. – 228 с.

5. Шептунов С.А. Жизненный цикл продукции. – М.: Янус-К, 2003 (ИПД Триальфа). – 244 с.

6. Idogawa, J., Bizarrias, F.S. and Câmara, R. Critical success factors for change management in business process management // Business Process Management Journal. 2023. Vol. 29. No. 7. pp. 2009-2033.

2. Bykova A.V., Karlova T.V. Identification of Optimal Parameters for Assessing the Effectiveness of Implementing a Customer Relationship Management System at an Enterprise. Quality. Innovation. Education. 2023;3(185): 25-33.

3. Gubernatorov O.N. Assessing the Quality Indicators of Automated Control System Facilities. Automation and Modelling in Design and Management. 2022;4(18):12-17.

4. Solomentsev Yu.M., Pavlov V.V. Simulation of Industrial Systems in Mechanical Engineering. Moscow: Janus-K; 2010.

5. Sheptunov S.A. Product Life Cycle. Moscow: Janus-K; 2003.

6. Idogawa J., Bizarrias F.S., Câmara R. Critical Success Factors for Change Management in Business Process Management. Business Process Management Journal. 2023;29(7):2009-2033.

#### **Информация об авторах:**

##### **Быкова Анна Владимировна**

аспирант кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления», МГТУ «СТАНКИН»

##### **Бекмешов Александр Юрьевич**

кандидат технических наук, Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук

#### **Information about the authors:**

##### **Bykova Anna Vladimirovna**

Postgraduate student of the Department «Automated Information Processing and Control Systems» of Moscow State University of Technology «STANKIN»

##### **Bekmeshov Alexander Yurievich**

Candidate of Technical Sciences, Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 13.02.2024; одобрена после рецензирования 28.02.2024; принята к публикации 03.03.2024.**

**The article was submitted 13.02.2024; approved after reviewing 28.02.2024; accepted for publication 14.03.2024.**

**Рецензент – Пугачев А.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.**

**Reviewer – Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.**

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.94

doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-42-48

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА ПРОГРАММ ПОДГОТОВКИ И ПЕРЕПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Валерий Владимирович Меньших<sup>1</sup>, Анна Викторовна Лихобабина<sup>2</sup>✉

<sup>1, 2</sup> Воронежский институт МВД России, г. Воронеж, Россия.

<sup>1</sup> menshikh@list.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9235-4997>.

<sup>2</sup> podolskihanna@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0003-0223-867X>.

**Аннотация.** Рассматривается задача моделирования процессов подготовки (переподготовки) специалистов для своевременного учёта изменений, происходящих в сфере их профессиональной деятельности. При этом учитывается, что направляемые на подготовку (переподготовку) специалисты могут обладать различным набором первоначальных компетенций. Вследствие этого в организациях, осуществляющих образовательную деятельность, могут существовать различные программы по подготовке (переподготовке), ориентированные на различный контингент обучающихся. Однако эти организации имеют ограниченные возможности по осуществлению деятельности рассматриваемого вида. Кроме того, указанные программы могут существенно различаться по затратам на их освоение как вследствие стоимости используемых ресурсов образовательной организации, так и стоимости командирования специалистов направляющей организацией. Поэтому в организациях, направляющих своих специалистов на подготовку (переподготовку), возникает необходимость выбора оптимального состава программ подготовки (переподготовки) специалистов, обеспечивающих получение каждым специалистом наибольшего количества новых компетенций при заданном ограничении на финансирование этой деятельности. Для решения данной задачи разработана математическая модель и обоснован выбор численного метода, основанного на использовании генетического алгоритма. С этой целью предложены применимые для решения данной задачи описание генов, хромосом и особей, правило формирования популяции, функция оценки приспособленности особей, операция селекции, кроссовер и способ мутации особей. Проведённые численные эксперименты показали высокую эффективность данного численного метода.

**Ключевые слова:** подготовка (переподготовка) специалистов, программы подготовки, компетенции, модель оптимизации выбора вариантов подготовки, численный метод, генетический алгоритм

**Для цитирования:** Меньших В.В., Лихобабина А.В. Моделирование процессов оптимизации выбора программ подготовки и переподготовки специалистов с использованием генетического алгоритма // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №1 (23). С. 42-48. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-42-48.

Original article

Open Access Article

## SIMULATING OPTIMIZATION PROCESSES FOR THE SELECTION OF TRAINING AND RETRAINING PROGRAMS FOR SPECIALISTS USING A GENETIC ALGORITHM

Valery V. Menshikh<sup>1</sup>, Anna V. Likhobabina<sup>2</sup>✉

<sup>1, 2</sup> The Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Voronezh, Russia

<sup>1</sup> menshikh@list.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9235-4997>.

<sup>2</sup> podolskihanna@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0003-0223-867X>.

**Abstract.** The article considers the problem of modelling the processes of training (retraining) specialists to take into account changes in their professional field in a timely manner. It is considered that specialists sent for training (retraining) may have a different set of initial competencies. As a result, organizations engaged in educational activities may have various training (retraining) programs aimed at a different contingent of students. However, these

organizations have limited capacity to carry out the activities of this type. In addition, these programs may vary significantly in terms of their development cost, both due to the cost of resources used by the educational organization and the cost of sending specialists by the dispatching organization. Therefore, organizations forwarding their specialists for training (retraining) need to select the optimal composition of training (retraining) programs for experts, providing each specialist with the greatest number of new competencies within a given constraint on financing this activity. To solve this problem, a mathematical model is developed and the choice of a numerical method based on using a genetic algorithm is substantiated. For this purpose the authors propose descriptions of genes, chromosomes, and individuals, as well as rules for forming a population, an evaluation function for individuals' fitness, a selection operation, a crossover, and a method of individuals' mutation. The conducted numerical experiments show the high efficiency of this numerical method.

**Keywords:** specialists training (retraining), training programs, competencies, optimization model of training option choice, numerical method, genetic algorithm

**For citation:** Menshikh V.V., Likhobabina A.V. Simulating Optimization Processes for the Selection of Training and Retraining Programs for Specialists Using a Genetic Algorithm. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 1 (23). pp. 42-48. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-42-48.

## Введение

Высокая динамика технологических, информационных и иных процессов в современных условиях приводят к необходимости постоянного совершенствования профессиональной подготовки и переподготовки специалистов, работающих в соответствующих сферах деятельности, что позволяет своевременно учитывать изменения в их профессиональной деятельности [1, 2]. Особую актуальность этот вопрос имеет для специалистов правоохранительных органов, которые должны своевременно и адекватно реагировать на появление новых угроз в сфере безопасности [3, 4].

Одним из способов такой подготовки является организация специальных программ подготовки и переподготовки специалистов [5 – 7].

При этом возникают следующие проблемы:

– цели программ подготовки сотрудников могут не в полной мере совпадать с целями организации, направляющей сотрудников, вследствие этого часть времени и ресурсов может быть направлена на получение сотрудниками недостаточно актуальных компетенций;

– каждая программа подготовки направлена на получение определённого набора компетенций, в то время как некоторые направляемые сотрудники уже могут обладать некоторыми из этих компетенций, что также приводит к непроизводительному расходованию времени и ресурсов;

– реализация каждой программы подготовки требует определённых финансовых затрат, а каждая организация, направляющая специалистов на подготовку (переподготовку), обладает ограниченными возможностями финансирования, что может приводить к тому, что не все направляемые сотрудники получают полный набор требуемых компетенций.

В связи с этим возникает задача такого распределения направляемых организацией сотрудников по имеющимся программам подготовки, чтобы максимизировать возможности получения ими новых необходимых компетенций в условиях ограничений на финансирование их подготовки (переподготовки).

В настоящее время указанная задача, как правило, решается эвристически. В данной работе разрабатывается математическая модель и численный метод решения задачи на основе использования генетического алгоритма [8, 9].

## Модель процесса получения компетенций при реализации программ подготовки специалистов

Обозначим:  $P = \{p_1, \dots, p_{|P|}\}$  – множество программ получения компетенций;

$K = \{k_1, \dots, k_{|K|}\}$  – множество актуальных компетенций, получение которых обеспечивается всеми программами;  $\alpha_i$  – важность компетенции  $k_i$  с точки зрения организации,

направляющей специалистов;  $l_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если полученная компетенция } k_i \\ \text{обеспечивается программой } p_j; \\ 0, \text{ если иначе;} \end{cases}$   $c_{ij}$  – финансовые

затраты на получение компетенции  $k_i$  одним специалистом при подготовке по программе  $p_j$ ;  $\hat{C}$  – ограничение по финансированию подготовки всех специалистов;  $S = \{s_1, \dots, s_{|S|}\}$  –

множество специалистов, направляемых на подготовку;

$n_{ii} = \begin{cases} 1, \text{ если } s\text{-й специалист обладает компетенцией} \\ k_i \text{ до начала подготовки;} \\ 0, \text{ если иначе;} \end{cases}$

Введем переменные:  $x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если специалист } s_i \text{ направляется} \\ \text{на подготовку по программе } p_j; \\ 0, \text{ если иначе;} \end{cases}$

Тогда  $\sum_{i=1}^{|S|} x_{ij}$  – число специалистов, направленных на подготовку по программе  $p_j$ ,

$l_{ij} x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если после подготовки по программе } p_j \\ \text{специалист } s_i \text{ обладает компетенцией } k_i; \\ 0, \text{ если иначе;} \end{cases}$

$\sum_{j=1}^{|P|} l_{ij} x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если специалист } s_i \text{ после подготовки} \\ \text{обладает компетенцией } k_i \text{ при условии, что} \\ \text{он проходил подготовку по одной программе;} \\ 0, \text{ если иначе;} \end{cases}$

$\max \left( 0; \sum_{j=1}^{|P|} l_{ij} x_{ij} - n_{ii} \right) = \begin{cases} 1, \text{ если специалист } s_i \text{ после подготовки} \\ \text{получил новую компетенцию } k_i; \\ 0, \text{ если иначе;} \end{cases}$

В таком случае эффективности подготовки специалиста  $S_t$  по одному направлению определяется выражением:

$$\sum_{i=1}^{|K|} \alpha_i \max \left( 0; \sum_{j=1}^{|P|} l_{ij} x_{ij} - n_{ii} \right),$$

а всех специалистов:

$$\sum_{i=1}^{|S|} \sum_{i=1}^{|K|} \alpha_i \max \left( 0; \sum_{j=1}^{|P|} l_{ij} x_{ij} - n_{ii} \right).$$

Финансовые затраты на подготовку всех специалистов определяются выражением:

$$\sum_{j=1}^{|P|} \sum_{i=1}^{|K|} c_{ij} l_{ij} \sum_{i=1}^{|S|} x_{ij}.$$

Обозначим  $X = \{x_{11}, \dots, x_{|S||P|}\}$ . В таком случае модель оптимизации распределения специалистов по программам обучения имеет вид:

$$X^* = \{x_{11}^*, \dots, x_{|S||P|}^*\} = \arg \max \sum_{i=1}^{|S|} \sum_{i=1}^{|K|} \alpha_i \max \left( 0; \sum_{j=1}^{|P|} l_{ij} x_{ij} - n_{ii} \right) \quad (1)$$

при ограничениях:

$$\sum_{j=1}^{|P|} \sum_{i=1}^{|K|} c_{ij} l_{ij} \sum_{t=1}^{|S|} x_{tj} \leq \hat{C}; \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{|P|} \sum_{t=1}^{|S|} x_{tj}^* = 1, \quad (3)$$

где  $\hat{C}$  – ограничение по финансированию подготовки всех специалистов; (3) – условие подготовки специалиста только по одному направлению.

В условиях ограничений на финансирование может оказаться, что после подготовки некоторые специалисты будут обладать не всеми требуемыми компетенциями. В этом случае:

$$1 - \text{sign} \left( \sum_{j=1}^{|P|} l_{ij} x_{tj}^* + n_{ij} \right) = \begin{cases} 1, & \text{если специалист } s_t \text{ после подготовки} \\ & \text{не обладает компетенцией } k_i; \\ 0, & \text{если иначе;} \end{cases}$$

$\sum_{i=1}^{|K|} \alpha_i \left( 1 - \text{sign} \left( \sum_{j=1}^{|P|} l_{ij} x_{tj}^* + n_{ij} \right) \right)$  – величина, характеризующая недостаточность в компетентности

специалиста  $s_t$  после обучения, а  $\sum_{t=1}^{|S|} \sum_{i=1}^{|K|} \alpha_i \left( 1 - \text{sign} \left( \sum_{j=1}^{|P|} l_{ij} x_{tj}^* + n_{ij} \right) \right)$  – величина,

характеризующая недостаточность компетентности всех специалистов после обучения при заданном объеме финансирования  $\hat{C}$ .

### Описание численного метода

Модель (1) – (3) представляет собой задачу нелинейного бинарного программирования. Эффективные методы решения этой задачи основаны на использовании различных эволюционных методов оптимизации и, в частности, генетического алгоритма, имеющего вычислительную сложность  $O(n^3)$  в отличие от других оптимизационных алгоритмов, имеющих, как правило, экспоненциальную сложность [10].

Обратимся к описанию данного метода. Все реализации генетического алгоритма отличаются [10 – 11] описанием генов, хромосом и особей; правилом формирования популяции; заданием функции приспособленности особей; операцией селекции; описанием способа скрещивания особей (кроссовера); способом мутации особей.

Основная идея заключается в том, чтобы моделировать процесс выбора вариантов программ подготовки специалистов как эволюционный процесс, в котором хромосомы, представляющие собой наборы генов, описывают выбор одного варианта программы подготовки одного специалиста, каждая особь представляет собой один вариант распределения всех специалистов по программам подготовки.

В этом случае особи удобно задавать матрицами:

$$Q = (q_{ij})_{\substack{i=1, \dots, |S| \\ j=1, \dots, |P|}}$$

где  $q_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если специалист } s_i \text{ направлен на программу } p_j; \\ 0, & \text{если иначе;} \end{cases}$

Элементы матрицы представляют собой гены, а строки – хромосомы. При этом выполняется условие, что в каждой строке только одна 1:

$$\forall t \sum_{j=1}^{|P|} q_{tj} = 1. \quad (4)$$

Начальная популяция формируется случайным образом. Селекция заключается в том, что в новое поколение отбирается заданное количество особей, имеющих наибольшее

значение функции приспособленности и отвечающих финансовым ограничениям на подготовку специалистов.

Функция приспособленности описывается следующим образом:

каждой матрице  $Q$  соответствует матрица  $R = (r_{ii})_{\substack{i=1, \dots, |S| \\ i=1, \dots, |K|}}$ ,

где  $r_{ii} = \begin{cases} 1, & \text{если специалист } s_i \text{ получает компетенцию } k_i; \\ 0, & \text{если иначе;} \end{cases}$ .

Будем считать, что до начала подготовки специалисты могут владеть определенным набором компетенций, который задан матрицей:

$$R^0 = r_{ii}^0 \substack{i=1, \dots, |S| \\ i=1, \dots, |K|},$$

где  $r_{ii}^0 = \begin{cases} 1, & \text{если специалист } s_i \text{ имеет компетенцию } k_i; \\ 0, & \text{если иначе;} \end{cases}$ .

Определим матричную операцию  $\oplus$  следующим образом:

$$\tilde{R} = R \oplus R^0, \quad \tilde{R} = (\tilde{r}_{ii})_{\substack{i=1, \dots, |S| \\ i=1, \dots, |K|}},$$

где элементы матрицы  $\tilde{R}$  определяются с помощью операции  $\otimes$ :

$$1 \otimes 1 = 1; 0 \otimes 0 = 0; 1 \otimes 0 = 0 \otimes 1 = 1 \vee 0.$$

Это означает, что  $\tilde{r}_{ii} = 1$  тогда и только тогда, когда специалист  $s_i$  либо изначально имел компетенцию  $k_i$  и не получал ее по программе  $p_j$ , либо изначально не имел компетенции  $k_i$  и получил ее по программе  $p_j$ .

Следовательно, финансовые средства на получение специалистом  $s_i$  компетенции  $k_i$  были использованы эффективно.

В таком случае, в качестве функции приспособленности целесообразно использовать  $\sum_{i=1}^{|K|} l_i \sum_{t=1}^{|S|} \tilde{r}_{it}$ , в которой учтены наличие и важности компетенций, имеющихся у специалистов, а также целесообразность использования финансовых средств.

Финансовые ограничения на подготовку всех специалистов по программам, соответствующим особи, описываемой матрицей  $R$ , определяются следующим образом:

$$\sum_{j=1}^{|P|} \sum_{i=1}^{|K|} c_{ij} l_{ij} \sum_{t=1}^{|S|} r_{it} \leq \hat{C}.$$

Обратимся к описанию кроссовера. Пусть две особи заданы матрицами:

$$Q^1 = (q_{ij}^1)_{\substack{i=1, \dots, |S| \\ j=1, \dots, |P|}} \text{ и } Q^2 = (q_{ij}^2)_{\substack{i=1, \dots, |S| \\ j=1, \dots, |P|}}.$$

При описании их скрещивания необходимо, чтобы вновь получаемая особь удовлетворяла условию (4).

Определим операцию  $Q = Q^1 \otimes Q^2$  следующим образом:

1) если  $q_{ij}^1 = q_{ij}^2$ , то  $q_{ij} = q_{ij}^1 q_{ij}^2$ ;

2) если  $q_{ij}^1 \neq q_{ij}^2$ , то найдутся такие  $j_1$  и  $j_2$  ( $j_1 \neq j_2$ ), что  $q_{j_1}^1 = q_{j_2}^2 = 1$ ,  $q_{j_2}^1 = q_{j_1}^2 = 0$ .

В этом случае равновероятно выбирается либо  $q_{ij}^1 = 1$  и  $q_{ij}^2 = 0$ , либо  $q_{ij}^1 = 0$  и  $q_{ij}^2 = 1$ .

В соответствии с условием (4) каждая строка матрицы  $Q$  должна содержать в точности одну 1. Поэтому мутация моделируется изменением с заданной вероятностью местоположения единственной в каждой строке 1, что соответствует случайному изменению выбора программ подготовки для специалистов.



## Заключение

Проведённые численные эксперименты показали высокую сходимость разработанного метода. В дальнейшем разработанный подход может быть использован для оптимизации процессов подготовки (переподготовки) специалистов в других заданных условиях. Например, при необходимости получения специалистами индивидуальных наборов компетенций и/или использования многоуровневых программ подготовки (переподготовки).

### Список источников:

1. Johnson R. The Role of Continuous Professional Development in Enhancing Specialist Competence // *Journal of Education and Training*. 2020. 25(1). 50-65.
2. Martinez E. The Importance of Lifelong Learning for Specialists in a Changing Work Environment // *Journal of Career Development*. 2019. 36(1). 40-55.
3. Моделирование коллективных действий сотрудников органов внутренних дел / В. В. Меньших, А. Ф. Самороковский и др. – Воронеж: Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации. – 2017. – 236 с.
4. Menshikh V., Sereda E., Kopylov A. Selection of learning path of specialist team for actions in emergency situations // *Proceedings. 2021 1st International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education, TELE 2021* : 1. Lipetsk. 2021. P. 160-164.
5. Меньших В.В., Самороковский А.Ф., Серeda Е.Н. Модель формирования групп для ролевого обучения принятию управленческих решений // *Вестник Воронежского института МВД России*. – 2015. – № 2. – С. 107-114.
6. Меньших В.В., Серeda Е.Н., Копылов А.Н. Моделирование процесса выбора траекторий обучения сотрудников органов внутренних дел действиям при чрезвычайных обстоятельствах // *Вестник Воронежского института МВД России*. – 2016. – № 2. – С. 203-212.
7. Меньших В.В., Серeda Е.Н. Математическая модель оптимизации траектории обучения сотрудников органов внутренних дел действиям при чрезвычайных обстоятельствах // *Вестник Воронежского института МВД России*. – 2015. – №3. – С. 36-44.
8. Меньших А.В. Использование эволюционной схемы для выбора мер устранения угроз безопасности при временных ограничениях // *Вестник Воронежского института МВД России*. – 2020. – № 4. – С. 94-100.
9. Деб К., Прапад А., Агарвал С., Мейяриван Т., Быстрый и элитарный многокритериальный генетический алгоритм: NSGA-II // *Эволюционные вычисления*. – 2002. – Т. 6. – № 2. – С. 182-197.
10. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебник. – 2-е изд. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 446 p.

### References:

1. Johnson R. The Role of Continuous Professional Development in Enhancing Specialist Competence. *Journal of Education and Training*. 2020;25(1):50-65.
2. Martinez E. The Importance of Lifelong Learning for Specialists in a Changing Work Environment. *Journal of Career Development*. 2019;36(1):40-55.
3. Menshikh V.V, Samorokovsky A.F, et al. Simulating Collective Actions of Employees of Internal Affairs Bodies. *Voronezh: Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation*; 2017.
4. Menshikh V, Sereda E, Kopylov A. Selection of Learning Path of Specialist Team for Actions in Emergency Situations. In: *Proceedings – 2021 of the 1st International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education: TELE 2021*. Lipetsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc: 2021; vol. 1. p. 160-164.
5. Menshikh V.V., Samorokovsky A.F., Sereda E.N. The Model of Group Formation for Role Training to Make Managerial Decisions. *The Bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2015;2:107-114.
6. Menshikh V.V., Sereda E.N., Kopylov A.N. Modelling the Trajectory Selection Processes for Training Police Officers to Act in an Emergency. *The Bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2016;2:203-212.
7. Menshikh V.V., Sereda E.N. Mathematical Model of Optimization of Learning Path in Training Staff of Law Enforcement Bodies for Actions in Cases of Emergency. *The Bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2015;3:36-44.
8. Menshikh A.V. The Use of Evolutionary Scheme for Choosing Measures of Eliminating Safety Threats Subject to Time Constraints. *The Bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2020;4:94-100.
9. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyyariyan T. A Fast and Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002;6(2):182-197.
10. Karpenko A.P. Modern Search Engine Optimization Algorithms. *Algorithms Inspired by Nature*. 2nd ed. Moscow: Bauman Press; 2017.

11.Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы / Под ред. В.М. Курейчика. – 2-е изд. М., 2010. – 368 с.

11. Gladkov L.A., Kureichik V.V., Kureichik V.M. Genetic Algorithms. Kureichik VM, editor. 2nd ed. Moscow; 2010.

**Информация об авторах:**

**Information about the authors:**

**Меньших Валерий Владимирович**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и моделирования систем Воронежского института МВД России, заслуженный деятель науки Российской Федерации, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, академик РАЕН

**Menshikh Valery Vladimirovich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department «Mathematics and System Modelling» of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Honoured Scientist of the Russian Federation, Honorary Worker of the Higher Professional Education of the Russian Federation, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences

**Лихобабина Анна Викторовна**

адъюнкт Воронежского института МВД России

**Likhobabina Anna Viktorovna**

Adjunct of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 28.11.2023; одобрена после рецензирования 09.01.2024; принята к публикации 20.01.2024.**

**The article was submitted 28.11.2023; approved after reviewing 09.01.2024; accepted for publication 20.01.2024.**

**Рецензент** – Пугачев А.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

**Reviewer** – Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.438

doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-49-57

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В СОПЛОВЫХ ЛОПАТКАХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

**Виктор Тимофеевич Перевезенцев<sup>1</sup>, Максим Андреевич Шилин<sup>2</sup>, Андрей Николаевич Дорошенко<sup>3✉</sup>, Роман Андреевич Ивашов<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup>Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

<sup>1</sup>79208318347@yandex.ru, <http://orcid.org/0009-0003-2177-0709>

<sup>2</sup>max05t@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0007-8781-2886>

<sup>3</sup>andrey.doroshenkov@ya.ru, <http://orcid.org/0009-0008-3071-1651>

<sup>4</sup>shroma755@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0002-4013-5009>

**Аннотация.** Приведены результаты численного исследования плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха на поверхность пластины, и плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями в каждой ячейке для вдува охлаждающего воздуха на поверхность пластины. Отверстия в ячейках сотовой конструкции для вдува охлаждающего воздуха на внешнюю поверхность пластины способствуют созданию на внешней поверхности пластины пленки охлаждающего воздуха (пленочное охлаждение). Так как отверстий для вдува охлаждающего воздуха в сотовой конструкции больше, чем при пленочном охлаждении, то такой способ охлаждения лопатки газовой турбины сравним с эффузионным охлаждением, которое считается одним из наиболее эффективных способов, и такой метод по эффективности охлаждения располагается между пленочным и транспирационным (пористым) охлаждением. В исследовании применен комбинированный способ охлаждения, который сочетает в себе как конвективный способ охлаждения, обусловленный вихревым движением охлаждающего воздуха внутри ячеек сотовой конструкции, располагающейся на внутренней поверхности лопатки, так и эффузионный способ охлаждения, реализованный вдувом охлаждающего воздуха на поверхность лопатки через отверстия в каждой ячейке сотовой структуры.

**Ключевые слова:** газовая турбина, сопловая лопатка, воздушное охлаждение, интенсификация теплообмена, сотовая конструкция

**Для цитирования:** Перевезенцев В.Т., Шилин М.А., Дорошенко А.Н., Ивашов Р.А. Использование сотовой поверхности для повышения интенсивности теплообмена в сопловых лопатках газовых турбин // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №1 (23). С. 49-57. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-49-57.

Original article

Open Access Article

## USE OF HONEYCOMB SURFACE TO INCREASE THE HEAT EXCHANGE INTENSITY IN NOZZLE BLADES OF GAS TURBINES

**Viktor T. Perevezentsev<sup>1</sup>, Maxim A. Shilin<sup>2</sup>, Andrey N. Doroshenkov<sup>3✉</sup>, Roman A. Ivashov<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup>Bryansk State Technical University; Bryansk, Russia

<sup>1</sup>79208318347@yandex.ru, <http://orcid.org/0009-0003-2177-0709>

<sup>2</sup>max05t@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0007-8781-2886>

<sup>3</sup>andrey.doroshenkov@ya.ru, <http://orcid.org/0009-0008-3071-1651>

<sup>4</sup>shroma755@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0002-4013-5009>

**Abstract.** The results of a numerical study of a flat plate containing honeycomb cells without holes for blowing cooling air onto the plate surface, and a flat plate containing honeycomb cells with holes in each cell for blowing cooling air onto the plate surface are presented. Holes in the cells of the honeycomb structure for blowing cooling air on the outer surface of the plate contribute to creating a film of cooling air on the outer surface of the plate (film cooling). Since

*there are more holes for blowing cooling air in the honeycomb design than in film cooling, this method of cooling a gas turbine blade is comparable to effusion cooling, which is considered one of the most effective methods, and this cooling method is located between film and transpiration (porous) cooling. The study used a combined cooling method that puts together both a convective cooling method due to the swirling movement of cooling air inside the honeycomb structure cells located on the blade inner surface, and an effusion cooling method, implemented by blowing cooling air onto the blade surface through holes in each honeycomb cell.*

**Keywords:** gas turbine, nozzle blade, air cooling, heat exchange intensification, honeycomb design

**For citation:** Perevezentsev V.T., Shilin M.A., Doroshenkov A.N., Ivashov R.A. Use of Honeycomb Surface to Increase the Heat Exchange Intensity in Nozzle Blades of Gas Turbines. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 1 (23). pp. 49-57. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-49-57.

## Введение

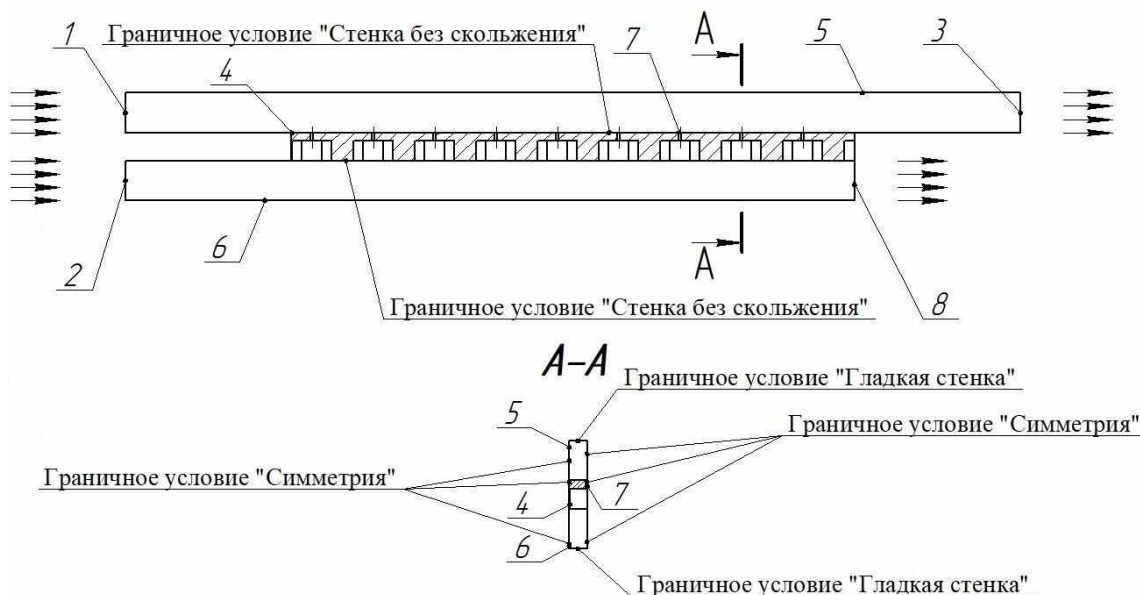
Одним из наиболее эффективных способов повышения коэффициента полезного действия газовой турбины является увеличение температуры газового потока на входе в турбину высокого давления. На сегодняшний день температура газа на входе в турбину достигает порядка 1850...1950 К. Для изготовления сопловых и рабочих лопаток газовых турбин используются жаропрочные сплавы. Однако допустимый уровень температуры, которую смогут выдержать сплавы, составляет около 1300 К [1].

С целью продления ресурса сопловых и рабочих лопаток газовых турбин в высокотемпературных условиях применяются различные способы воздушного охлаждения. Одним из способов повышения эффективности охлаждения является турбулизация потока в пристеночной зоне лопаток, которая осуществляется нанесением на поверхность лопаток ребер [2, 3], сферических углублений [4, 5], вихревых матриц [6, 7] и т.д. Для охлаждения внешней поверхности лопаток газовых турбин применяется пленочное охлаждение [8, 9]. Данный способ сопровождается формированием на внешней поверхности лопатки пленки охлаждающего воздуха, поступающего через отверстия для пленочного охлаждения. Наиболее перспективным и высокоэффективным на сегодняшний день является транспирационное (пористое) охлаждение [10, 11]. При таком способе охлаждения охлаждающий воздух поступает на поверхность лопатки через пористый материал и равномерно распределяется на внешней поверхности лопатки. Эффузионный способ охлаждения [12, 13] по эффективности располагается между пленочным и пористым охлаждением. Основное отличие между пленочным охлаждением и эффузионным заключается в количестве и размере используемых отверстий для вдува охлаждающего воздуха на поверхность лопатки. Эффузионное охлаждение сочетает в себе множество плотно расположенных друг к другу отверстий для вдува охлаждающего воздуха малого диаметра, в то время как пленочное охлаждение связано с относительно меньшим количеством отверстий большого диаметра.

Сотовая конструкция также способствует турбулизации потока в пристеночном течении [14]. В настоящей статье приведены результаты численного исследования плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха на поверхность пластины, и плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями в каждой ячейке сотовой структуры для вдува охлаждающего воздуха на поверхность пластины.

## Расчетная область проведенного исследования

В представленном численном исследовании использовался метод конечных объемов. На рис. 1 обозначены граничные условия расчетной области и ее описание. На рис. 2 отображены геометрические размеры расчетной области настоящего исследования.

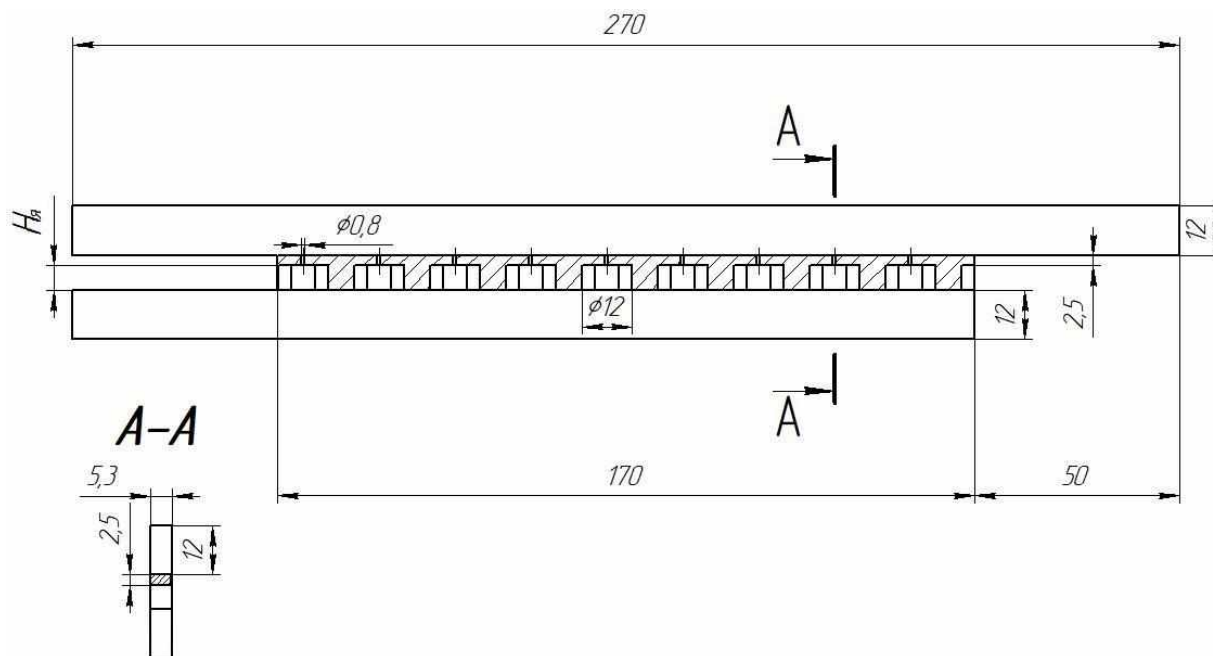


**Рис. 1. Расчетная область:**

1 – область входа основного потока (газ), 2 – область входа вторичного потока (охлаждающий воздух), 3 – область свободного выхода, 4 – сотовая поверхность, 5 – аэродинамический канал, в котором течет основной поток (газ), 6 – аэродинамический канал, в котором течет вторичный поток (охлаждающий воздух), 7 – отверстия для вдува охлаждающего воздуха на поверхность плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры, 8 – область выхода вторичного потока

**Fig. 1. Design area:**

1 – the main stream inlet area (gas), 2 – the secondary stream inlet area (cooling air), 3 – the free outlet area, 4 – honeycomb surface, 5 – the aerodynamic channel into which the main stream (gas) flows, 6 – the aerodynamic channel in which a secondary stream (cooling air) flows, 7 – holes for injecting cooling air onto the surface of a flat plate containing cells of a honeycomb structure, 8 – the outlet area of the secondary stream



**Рис. 2. Геометрические размеры расчетной области**

**Fig. 2. Geometric dimensions of the calculated area**

Исследование было выполнено в программе OpenFOAM. В численном моделировании применялся метод конечных объемов. Материалом для сотовой структуры в данном исследовании является медь. Для основного потока (газ) и вторичного (охлаждающий воздух)

задаем газообразную среду – воздух. Поток частично сжимаемый. Длина канала, в котором течет основной поток составляет  $L_{\text{осн}} = 270$  мм, длина канала, в котором течет вторичный поток составляет  $L_{\text{вт}} = 220$  мм, высота канала, в котором течет основной поток составляет  $H_{\text{осн}} = 12$  мм, высота канала, в котором течет вторичный поток составляет  $H_{\text{вт}} = 12$  мм, длина пластины, содержащей ячейки сотовой структуры, составляет  $L_{\text{пл}} = 170$  мм, значение диаметра отверстия для вдува охлаждающего воздуха на поверхность пластины составляет  $d_{\text{отв}} = 0,8$  мм, толщина пластины, содержащей ячейки сотовой структуры составляет  $H_{\text{пл}} = 2,5$  мм, диаметр окружности, описанной вокруг ячейки сотовой структуры составляет  $d_{\text{я}} = 12$  мм.

Для области входа основного потока задаем начальные параметры: скорость основного потока составляет  $V_{\Gamma} = 200$  м/с, температура основного потока составляет  $T_{\Gamma} = 400$  К, течение турбулентное. Выбираем модель турбулентности для численного исследования SST.

Для области входа вторичного потока задаем начальные параметры: абсолютное давление охлаждающего воздуха составляет  $p_{\text{охл}} = 200\ 000$  Па, температура вторичного потока составляет  $T_{\text{охл}} = 293$  К.

Для проведения численного исследования отношение высоты ячейки сотовой структуры к диаметру окружности, описанной вокруг ячейки сотовой структуры, варьируется от  $H_{\text{я}}/d_{\text{я}} = 0,25 \dots 2$  (0,25; 0,5; 1; 2). В настоящем эксперименте исследование проводится как с плоской пластиной, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха на поверхность пластины, и плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями в каждой ячейке для вдува охлаждающего воздуха на поверхность пластины.

## Результаты моделирования и их обсуждение

На первом этапе произведем обдув плоской пластины, не содержащей ячейки сотовой структуры, с целью дальнейшего сравнения значения средней температуры поверхности со значением температуры, получаемой от нанесения на плоскую поверхность ячеек сотовой структуры как с отверстиями в каждой ячейке для вдува охлаждающего воздуха на поверхность плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры, так и без отверстий.

В настоящем исследовании горячий воздух (основной поток) обтекает внешнюю поверхность плоской пластины, а холодный воздух (вторичный поток) воздействует на внутреннюю поверхность плоской пластины. По результатам исследования происходит полное и равномерное прогревание плоской пластины под воздействием основного потока и совсем незначительное ее охлаждение, сопровождающееся обтеканием внутренней поверхности пластины вторичным потоком. На внутренней поверхности плоской пластины, обтекаемой холодным воздухом, происходит постепенное равномерное нарастание пограничного слоя вдоль течения охлаждающего воздуха. Пограничный слой способствует незначительному снижению воздействия охлаждающего воздуха на поверхность пластины. С внешней стороны плоской пластины вдоль течения основного потока также происходит постепенное нарастание пограничного слоя, который препятствует воздействию теплового потока на поверхность пластины.

Средняя температура поверхности плоской пластины в результате исследования составила  $T_{\text{ср. плоск. пл}} = 397$  К.

На втором этапе реализован обдув плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха. Для проведения исследования на текущем этапе отношение высоты ячейки сотовой структуры к диаметру окружности, описанной вокруг ячейки сотовой структуры, варьируется  $H_{\text{я}}/d_{\text{я}} = 0,25 \dots 2$  (0,25; 0,5; 1; 2). Результаты значений средней температуры поверхности представлены в табл. 1.

## Результаты исследований

Table 1

*Research results*

| Модель для исследования  | $H_{я}/d_{я}$ | Средняя температура поверхности $T_{ср}$ , К |
|--|---------------|--|
| Плоская пластина   | -             | 397,00                                       |
| Плоская пластина, содержащая ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха | 0,25          | 378,60                                       |
|  | 0,50          | 375,00                                       |
|  | 1,00          | 372,00                                       |
|  | 2,00          | 370,00                                       |
| Плоская пластина, содержащая ячейки сотовой структуры с отверстиями для вдува охлаждающего воздуха | 0,25          | 318,04                                       |
|  | 0,50          | 318,50                                       |
|  | 1,00          | 317,80                                       |
|  | 2,00          | 319,20                                       |

При обтекании плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха, отношение  $H_{я}/d_{я}$  которой составляет 0,25, холодным воздухом, внутри ячеек сотовой структуры формируется маленький вращающийся вихрь, обтекающий внутреннюю поверхность каждой ячейки сотовой структуры и выходящий из ячеек в область вторичного потока (охлаждающего воздуха). При этом температура охлаждающего воздуха, касающегося поверхностей ячейки сотовой структуры повышается. Температура охлаждающего воздуха внутри первой по ходу течения вторичного потока ячейке ниже для каждого соотношения  $H_{я}/d_{я}$ , чем в последующих ячейках сотовой структуры, и она заметно выше в каждой последующей ниже находящейся по течению ячейке, чем в первой. При этом средняя температура поверхности, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха, ниже, чем средняя температура поверхности плоской пластины без сотовой структуры, но этого недостаточно для обеспечения высокой эффективности охлаждения. С увеличением отношения  $H_{я}/d_{я}$  происходит увеличение вихря, обтекающего внутреннюю поверхность ячейки сотовой структуры. При соотношении  $H_{я}/d_{я} = 2$  (рис. 3) в ячейках сот в поле зрения наблюдается большой одиночный медленно вращающийся вихрь.

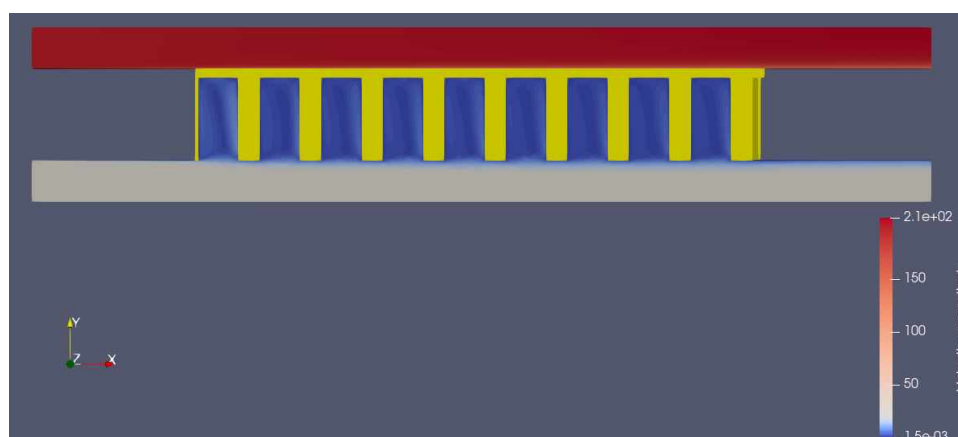
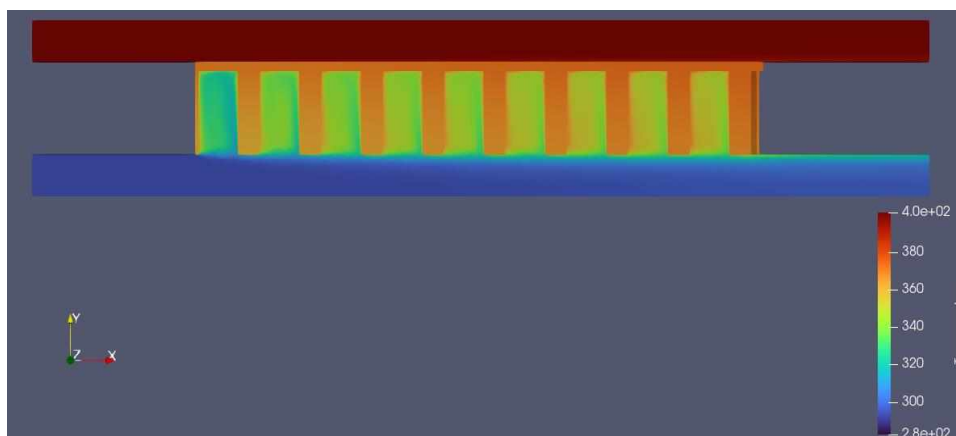


Рис. 3. Результат исследования обтекания плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха, при  $H_{я}/d_{я} = 2$ . Распределение скорости  
 Fig. 3. The result of a study of the flow around a flat plate containing cells of a honeycomb structure without holes for injecting cooling air, at  $H_{я}/d_{я} = 2$ . Velocity distribution

На плоской поверхности, содержащей ячейки сотовой структуры, со стороны горячего газа вдоль направления течения происходит незначительное постепенное нарастание пограничного слоя при всех соотношениях  $H_{\text{я}}/d_{\text{я}}$ . Также с увеличением отношения  $H_{\text{я}}/d_{\text{я}}$  от 0,25 и до 2, средняя температура поверхности образцов снижается (см. табл. 1), что говорит о небольшом повышении эффективности охлаждения сотовой поверхности с увеличением соотношения  $H_{\text{я}}/d_{\text{я}}$ .

Распределение температуры на поверхности плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха, представлено на рис. 4.



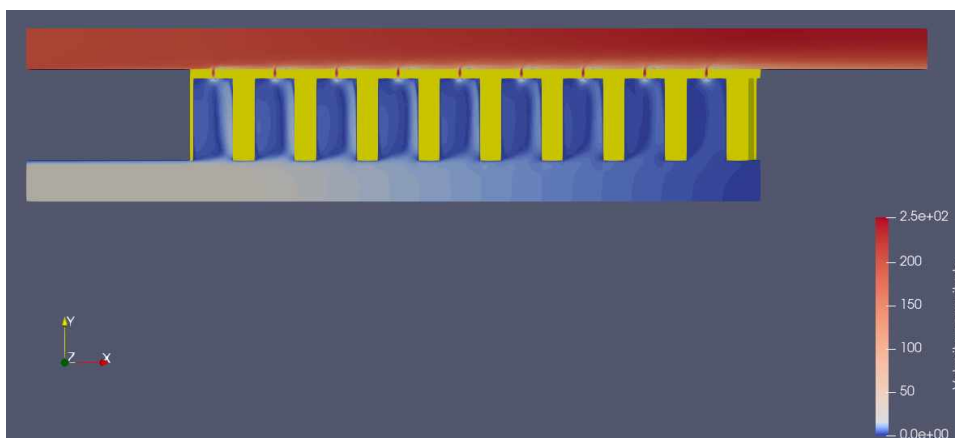
**Рис. 4. Результат исследования обтекания плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха, при  $H_{\text{я}}/d_{\text{я}} = 2$ . Распределение температуры**  
*Fig. 4. The result of a study of the flow around a flat plate containing cells of a honeycomb structure without holes for injecting cooling air, at  $H_{\text{я}}/d_{\text{я}} = 2$ . Temperature distribution*

На третьем этапе произведен обдув плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями в каждой ячейке для вдува охлаждающего воздуха на плоскую поверхность со стороны горячего газа. Для данного этапа исследования значения отношения  $H_{\text{я}}/d_{\text{я}}$  варьируются в тех же значениях, как и для второго этапа.

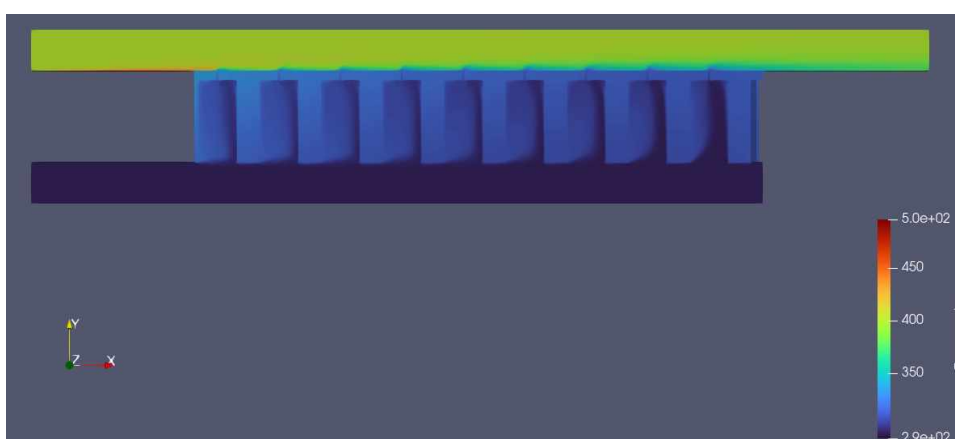
По сравнению со значениями средней температуры поверхности, полученными во втором этапе исследования, происходит снижение средней температуры поверхности, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями для вдува охлаждающего воздуха. То есть значения средней температуры поверхности плоских пластин, содержащих ячейки сотовой структуры с отверстиями для вдува охлаждающего воздуха, ниже значений средней температуры поверхности плоских пластин, содержащих ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха. На поверхности плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями для вдува охлаждающего воздуха, со стороны основного потока (горячего газа) наблюдается образование пленки охлаждающего воздуха, толщина которой постепенно растет по направлению течения основного потока для каждого соотношения  $H_{\text{я}}/d_{\text{я}}$ . Образовавшаяся на внешней поверхности образцов пленка охлаждающего воздуха препятствует воздействию теплового потока со стороны горячего газа.

Распределение значений скорости и температуры при обтекании плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями для вдува охлаждающего воздуха, при  $H_{\text{я}}/d_{\text{я}} = 2$  представлено на рис. 5 и рис. 6 соответственно.





**Рис. 5. Результат исследования обтекания плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями для вдува охлаждающего воздуха, при  $H_w/d_n = 2$ . Распределение скорости**  
**Fig. 5. Results of a study of the flow around a flat plate containing cells of a honeycomb structure with holes for injecting cooling air, at  $H_w/d_n = 2$ . Speed distribution**



**Рис. 6. Результат исследования обтекания плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями для вдува охлаждающего воздуха, при  $H_w/d_n = 2$ . Распределение температуры**  
**Fig. 6. Results of a study of the flow around a flat plate containing cells of a honeycomb structure with holes for injecting cooling air, at  $H_w/d_n = 2$ . Temperature distribution**

### Заключение

В статье приведены результаты численного исследования плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры без отверстий для вдува охлаждающего воздуха на поверхность пластины, и плоской пластины, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями в каждой ячейке для вдува охлаждающего воздуха на поверхность пластины. Сочетание поверхности, содержащей ячейки сотовой структуры с отверстиями в каждой ячейке для вдува охлаждающего воздуха на плоскую поверхность со стороны горячего газа приводит к снижению средней температуры поверхности образцов. Стремление сформировать отверстия для вдува охлаждающего воздуха в каждой из ячеек приводит к приближению транспирационного способа охлаждения, которое является самым перспективным на сегодняшний день. Представленный способ охлаждения следует отнести к конвективному способу охлаждения, формирующемуся созданием на плоской поверхности сотовой структуры, и к эффузионному способу охлаждения, сопровождающемуся вдувом охлаждающего воздуха через отверстия в каждой ячейке сотовой структуры, которое способствует охлаждению внешней поверхности лопатки газовой турбины. Пример конструктивного выполнения конвективного способа для направляющей (сопловой) лопатки высокотемпературной газовой турбины представлен в патенте [15].

### Список источников:

1. Хабибуллин И.И. Интенсификация теплообмена двухполостными диффузорными выемками: специальность 01.04.14 "Теплофизика и теоретическая теплотехника": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Хабибуллин Ильмир Ильдарович. – Казань, 2016. – 124 с.
2. Xu J. et al. Systematic Comparison on Convective Heat Transfer Characteristics of Several Pin Fins for Turbine Cooling // *Crystals*. – 2021. – Vol. 11(8). – P. 1-17.
3. Moradi T., Shahbazian H., Hoseinalipour M., Sunden B. Effects of wavy ribs on vortex generation and thermal-hydraulic performance in a rotating rectangular channel // *Applied Thermal Engineering*. – 2023. – Vol. 222. – P. 1-20.
4. Rao Y., Li B., Feng Y. Heat transfer of turbulent flow over surfaces with spherical dimples and teardrop dimples // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2015. – Vol. 61. – P. 201-209.
5. Zhou W., Rao Y., Hu H. An experimental investigation on the characteristics of turbulent boundary layer flows over a dimpled surface // *Transactions of the ASME. J. of Fluids Engineering*. – 2016. – Vol. 138. № 2. – P. 1-13.
6. Ярославцев Н.Л., Викулин А.В., Ремчуков С.С. Использование вихревых матриц в конструкции лопаток высокотемпературных газовых турбин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2019. – Т. 21. – № 1. – С. 172-177.
7. Oh I.T. et al. Local Heat/Mass Transfer and Friction Loss Measurement in a Rotating Matrix Cooling Channel // *J. of Heat Transfer*. – 2012. – Vol. 134 (1). – P. 1-9.
8. Wei H., Zu Y.Q. Experimental study on heat transfer and throughflow losses characteristics of single/triple-row holes with an engine-representative density ratio // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2021. – Vol. 28. – P. 1-19.
9. Грине М., Боуэлем Х., Деллил А.З., Аззи А. Улучшение эффективности адиабатического пленочного охлаждения в поперечном и продольном направлениях путем сочетания преграды в форме бархана и антивихревых компоновок // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2020. – Т. 27, № 5. – С. 787-797.
10. Викулин А.В. Ярославцев Н.Л., Земляная В.А. Исследование транспирационного охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин // *Теплоэнергетика*. – 2019. – № 6. – С. 27-32.
11. Cerminara Adriano Turbulence Effect on Transpiration Cooling Effectiveness Over a Flat Plate in Hypersonic Flow and Sensitivity to Injection Parameters // *Flow, Turbulence and Combustion*. – 2023. – №. 110 (4). – P. 945-968.
12. Murray Alexander V. et al. High Resolution Experimental and Computational Methods for Modelling Multiple Row Effusion Cooling Performance // *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*. – 2018. – Vol. 3, № 1. – P. 1-16.

### References:

1. Khabibullin I.I. Intensification of Heat Exchange With Two-Cavity Diffuser Recesses. Candidate's Thesis in Engineering. Kazan; 2016.
2. Xu J, et al. Systematic Comparison on Convective Heat Transfer Characteristics of Several Pin Fins for Turbine Cooling. *Crystals*. 2021;11(8):1-17.
3. Moradi T., Shahbazian H., Hoseinalipour M., Sunden B. Effects of Wavy Ribs on Vortex Generation and Thermal-Hydraulic Performance in a Rotating Rectangular Channel. *Applied Thermal Engineering*. 2023;222:1-20.
4. Rao Y., Li B., Feng Y. Heat Transfer of Turbulent Flow Over Surfaces With Spherical Dimples and Teardrop Dimples. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2015;61:201-209.
5. Zhou W., Rao Y., Hu H. An Experimental Investigation on the Characteristics of Turbulent Boundary Layer Flows Over a Dimpled Surface. *Journal of Fluids Engineering*. 2016;138(2):1-13.
6. Yaroslavtsev N.L., Vikulin A.V., Remchukov S.S. The Using of Vortex Matrices in the Construction of Blades and High-Temperature Gas Turbines. *Izvestia of Samara Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2019; 21(1):172-177.
7. Oh IT, et al. Local Heat/Mass Transfer and Friction Loss Measurement in a Rotating Matrix Cooling Channel. *Journal of Heat Transfer*. 2012;134(1):1-9.
8. Wei H., Zu Y.Q. Experimental Study on Heat Transfer and Throughflow Losses Characteristics of Single/Triple-Row Holes With an Engine-Representative Density Ratio. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021;28:1-19.
9. Grine M., Boualem H., Dellil A.Z., Azzi A. Improving Adiabatic Film-Cooling Effectiveness Spanwise and Lateral Directions by Combining BDSR and Anti-Vortex Designs. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2020;27(5):787-797.
10. Vikulin, A.V. Yaroslavtsev N.L., Zemlyanaya V.A. Investigations Into Transpiration Cooling of Blades in High-Temperature Gas Turbines. *Thermal Engineering*. 2019;6:27-32.
11. Cerminara A. Turbulence Effect on Transpiration Cooling Effectiveness Over a Flat Plate in Hypersonic Flow and Sensitivity to Injection Parameters. *Flow, Turbulence and Combustion*. 2023;110(4):945-968.
12. Murray AV, et al. High Resolution Experimental and Computational Methods for Modelling Multiple Row Effusion Cooling Performance. *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*. 2018;3(1):1-16.

13. Wang W., Cui J., Qu S. Effects of hole arrangement and trenched hole on multirow film cooling // AIP Advances. – 2022. – Vol. 12, № 4. – P. 1-13.

14. Сотовые уплотнения в турбомашинах: монография / В.Т. Буглаев, В.Т. Перевезенцев, С.В. Перевезенцев и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – Брянск: БГТУ, 2006. – 192 с.

15. Патент № 2810858 Российская Федерация МПК F01D 5/18 (2006.01), СПК F01D 5/18 (2023.08). Способ охлаждения направляющей лопатки турбины и устройство, реализующее способ: № 2023106228: заявл. 16.03.2023; опубл. 28.12.2023 / Перевезенцев В. Т., Осипов А. В., Куликова Д. А., Дорошенко А. Н. – 6 с.

13. Wang W., Cui J., Qu S. Effects of Hole Arrangement and Trenched Hole on Multirow Film Cooling. AIP Advances. 2022;12(4):1-13.

14. Buglaev VT, Perevezentsev VT, Perevezentsev SV, et al. Honeycomb Seals in Turbomachines. 2nd ed. Bryansk: BSTU; 2006.

15. Perevezentsev V.T., Osipov A.V., Kulikova D.A., Doroshenkov A.N. Patent No. 2810858 Russian Federation, IPC F01D 5/18 (2006.01), SPK F01D 5/18 (2023.08). A Method for Cooling a Turbine Guide Blade and a Device that Implements the Method, no. 2023106228 (28.12.2023).

#### **Информация об авторах:**

##### **Перевезенцев Виктор Тимофеевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Турбиностроение, электро- и теплоэнергетика» Брянского государственного технического университета, <http://orcid.org/0009-0003-2177-0709>

##### **Шилин Максим Андреевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Турбиностроение, электро- и теплоэнергетика» Брянского государственного технического университета, <http://orcid.org/0009-0007-8781-2886>

##### **Дорошенко Андрей Николаевич**

аспирант, ассистент кафедры «Турбиностроение, электро- и теплоэнергетика» Брянского государственного технического университета, <http://orcid.org/0009-0008-3071-1651>

##### **Ивашов Роман Андреевич**

студент кафедры «Турбиностроение, электро- и теплоэнергетика» Брянского государственного технического университета, <http://orcid.org/0009-0002-4013-5009>

#### **Information about the authors:**

##### **Perevezentsev Viktor Timofeevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Turbine Engineering, Electric and Thermal Power Engineering» of Bryansk State Technical University

##### **Shilin Maxim Andreevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Turbine Engineering, Electric and Thermal Power Engineering» of Bryansk State Technical University

##### **Doroshenkov Andrey Nikolaevich**

Postgraduate student, assistant at the Department «Turbine Engineering, Electric and Thermal Power Engineering» of Bryansk State Technical University

##### **Ivashov Roman Andreevich**

Student of the department of «Turbine Engineering, Electric and Thermal Power Engineering» of Bryansk State Technical University

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 15.01.2024; одобрена после рецензирования 21.02.2024; принята к публикации 23.03.2024.**

**The article was submitted 15.01.2024; approved after reviewing 21.02.2024; accepted for publication 23.03.2024.**

**Рецензент – Голушко А.Н., кандидат технических наук, ООО «Новатэк-Юрхаровнефтегаз».  
Reviewer – Golushko A.N., Candidate of Technical Sciences, PAO NOVATEK.**

## Управление в организационных системах

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.056.53

doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-58-64

### МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНЗАКЦИЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АНТИФРОД-СИСТЕМЫ

Любовь Евгеньевна Батюкова<sup>1</sup>, Татьяна Владимировна Карлова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук, г. Москва, Россия

<sup>1</sup> lyubabatyukova@yandex.ru

<sup>2</sup> karlova-t@yandex.ru

**Аннотация.** Целью данной научной работы является предложение методики обеспечения безопасности транзакций в коммерческих структурах с использованием антифрод-системы. Статья посвящена анализу актуальных проблем в сфере информационной безопасности в финансовом секторе, а именно применению антифрод-систем, призванных верно определять нелегитимные платежные операции для их своевременного предотвращения. Рассмотрен вопрос целесообразности использования машинного обучения в антифрод-системах как инструмента, отвечающего за повышение точности выполнения проверок в процессах работы с большими данными. Новизна исследования заключается в предложении схемы взаимодействия подсистем антифрод-механизмов с использованием ручной проверки экспертом, что подходит для организаций, которым необходимо вручную просматривать каждый установленный случай Интернет-мошенничества. Результатом работы являются рекомендации для подготовки к выбору антифрод-системы, схемы взаимодействия подсистем антифрод-программы.

**Ключевые слова:** антифрод, машинное обучение, информационная безопасность, интернет транзакции

**Для цитирования:** Батюкова Л.Е., Карлова Т.В. Методика обеспечения безопасности транзакций на основе использования антифрод-системы // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №1 (23). С. 58-64. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-58-64.

Original article

Open Access Article

### METHODOLOGY FOR ENSURING THE TRANSACTION SECURITY BASED ON USING AN ANTI-FRAUD SYSTEM

Lyubov E. Batyukova<sup>1</sup>, Tatyana V. Karlova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

<sup>2</sup> Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>1</sup> lyubabatyukova@yandex.ru

<sup>2</sup> karlova-t@yandex.ru

**Abstract.** The aim of this scientific work is to propose a methodology for ensuring the security of transactions in commercial structures using an anti-fraud system. The article is devoted to analyzing the current problems in the field of information security in the financial sector; namely the use of anti-fraud systems designed to correctly identify illegitimate

payment transactions for their timely prevention. The paper considers the feasibility question using machine learning in anti-fraud systems as a tool responsible for increasing the accuracy of checks while working with big data. The novelty of the study lies in proposing a scheme for the subsystem interaction of anti-fraud mechanisms using an expert's manual verification, which is suitable for organizations that need to manually review each identified case of the Internet fraud. The work results in recommendations for preparing for the selection of an anti-fraud system, and a scheme for the subsystem interaction of the anti-fraud program.

**Keywords:** antifraud, machine learning, information security, Internet transactions

**For citation:** Batyukova L.E., Karlova T.V. Methodology for Ensuring the Transaction Security Based on Using an Anti-Fraud System. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 1 (23). pp. 58-64. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-58-64.

## Введение

Рост цифровизации способствует не только развитию технологий и удобству управления всеми сферами общественной жизни, но и увеличивает риск мошеннических действий в Интернете, что побуждает многие организации к тщательному продумыванию вопроса безопасности. Наиболее стандартным решением проблемы мошенничества в сфере информационных технологий являются антифрод-системы, призванные выявлять нелегитимные операции в финансовых, телекоммуникационных и других коммерческих структурах. В статье предложена методика поддержки защиты от мошеннических транзакций на основе использования антифрод-системы с применением инструментов машинного обучения, позволяющая вовремя оказывать противодействие Интернет-злоумышленникам в корпоративном бизнесе.

### Постановка задачи обеспечения защиты от несанкционированных действий в коммерческом секторе

В 2022 году объем украденных средств злоумышленниками составил 14,2 млрд рублей, что больше почти на 5 %, по сравнению с показателями 2021 года. Основной объем похищенных средств приходится на взлом мобильных приложений банка или личных кабинетов. Около 20 % были украдены посредством оплаты товаров и услуг в Интернете. Наименьший процент приходится на использование банкоматов без согласия клиента. Статистика показывает, что количество мошеннических транзакций растет ежегодно. Это обусловлено, в первую очередь, увеличением рынка безналичных платежей. Кроме того, большой проблемой с точки зрения безопасности, является сервис мгновенных переводов, благодаря которому за несколько секунд можно перевести крупные суммы денежных средств преступнику.

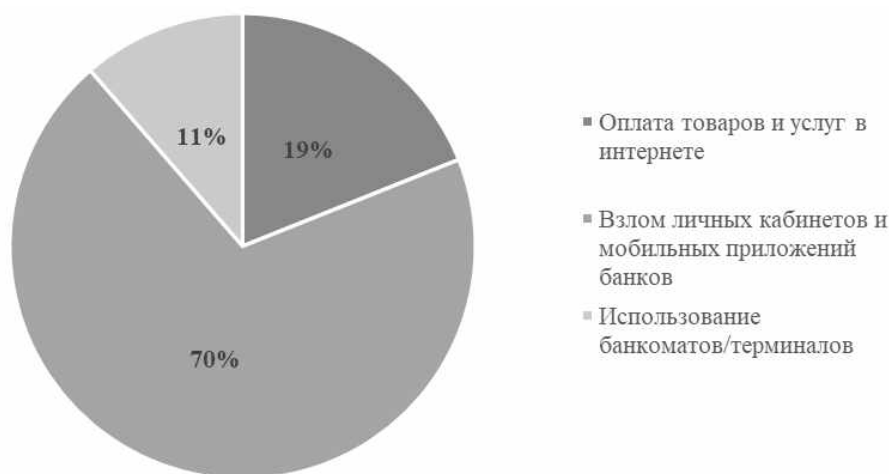


Рис. 1. Процентное распределение похищенных денежных средств в 2022 году  
Fig. 1. Percentage distribution of stolen funds in 2022

Возврат денежных средств жертвам мошенников при этом составил только 4,4 % от общей украденной суммы. Такой низкий процент объясняется тем, что мошенники в

большинстве случаев используют приемы социальной инженерии, суть которых заключается в том, что пострадавший, находясь под психологическим воздействием, добровольно переводит мошенникам деньги, либо сообщает им банковские сведения, там самым предоставляя доступ в личный кабинет банка или приложения.

Такая статистика побуждает банки, интернет-магазины, государственные учреждения прилагать усилия по безопасности своих клиентов. Основным способом борьбы с мошенниками в сфере информационных технологий являются системы мер по предотвращению и борьбе с мошенничеством – антифрод-системы.

### **Подготовка к внедрению антифрод-системы**

Экономическая целесообразность внедрения антифрод-систем в банковских и коммерческих предприятиях, как правило, не подвергается сомнению. Инструменты для противодействия мошенничеству в финансовом секторе способны значительно снизить ущерб организаций и их клиентов от нелегитимных операций. Для того, чтобы определиться с финальным способом защиты компаниям необходимо ответить на массу вопросов.

Первый вопрос заключается в выборе типа антифрод-системы: транзакционный или сессионный. Транзакционные антифрод-системы характеризуются автоматической проверкой конкретной транзакции, в ходе которой происходит оценка рисков с целью защиты системы от мошенничества. Примером может служить оплата покупки или перевод денег другому человеку. В данном случае система оценивает транзакцию по определенным параметрам и выносит решение о ее блокировке, отправке ответственному в качестве подозрительного действия, либо успешном пропуске транзакции.

Немало важным преимуществом антифрод-системы является предотвращение мошеннических платежей, до того как они были совершены. Для этого используются сессионные антифрод-инструменты, выявляющие нетипичное поведение пользователя приложения или сайта. Системы сессионного типа концентрируются на проверке действий пользователя во время конкретной активности, т.е. система оценивает действия как стандартное поведение пользователя или нетипичное. В качестве атипичного поведения может быть расценена нехарактерная траектория движения курсора или изменение скорости набора текста. При большом количестве отклонений от стандартного поведения пользователя система выносит решение о блокировке. Кроме того, существует смешанный транзакционно-сессионный тип антифрод-системы, сочетающий черты обоих типов.

Второй вопрос заключается в выборе поставки антифрод-системы. Существует возможность облачного решения, отличительной особенностью которого является значительно более короткая скорость подключения, при этом информация передается в зашифрованном виде с помощью хэширования. Есть вариант локального размещения у заказчика, для этого со стороны компании необходима полноценная инфраструктура для функционирования антифрод-системы, а также специалисты, которые обеспечат работу систему. Затраты для компании в данном случае выше, но преимущество заключается в возможности самостоятельно контролировать информацию.

Важным фактором при выборе антифрод-системы является необходимость использования истории данных. Транзакции или данные хранятся в базе данных, и чем больше параметров и правил используется при проверке, тем сильнее нагрузка на базу, что обеспечивает спад ее производительности. Поэтому для увеличения скорости работы антифрод-системы используют технологию рестроспективности.

При выборе антифрода нужно учесть необходимость работы с внешними источниками данных. Для банковской сферы важно иметь возможность взаимодействовать с внешними источниками данных, в частности, для проверки черных списков Банка России, что позволит обладать актуальной информацией по списку лиц, уличенных в мошеннических действиях. Организациям, планирующим внедрение антифрод-системы, необходимо понимать частоту обновления программы. Чтобы правила соответствовали актуальным видам угроз, важно использовать свежие данные о мошенничестве.

## Целесообразность использования машинного обучения в антифрод-системе

Современные антифрод-системы помимо стандартных правил содержат в себе модуль машинного обучения. Этот модуль способен создать профиль пользователя на основе статистических данных и оценивать его действия как типичные или нетипичные. На основе статистических и ретроспективных данных составляется некий портрет клиента – образ его стандартных действий при совершении транзакции. В случае если система видит, что совершаемые действия нехарактерны для пользователя, то маркирует платеж как подозрительный.

Основными причинами, способствующими применению машинного обучения в антифрод-системах, способствуют следующие факторы:

1. Создание системы правил требует больших временных затрат аналитиков: необходимо собрать все возможные данные о транзакции, преобразовать и обработать их, провести анализ для максимально верной оценки веса каждого параметра. В ходе данного процесса некоторые данные могут быть не упущены. Кроме того, базовых атрибутов вроде суммы и времени транзакции бывает недостаточно для поиска закономерностей. Поэтому из имеющихся данных аналитики формируют дополнительные сложносоставные атрибуты, что может повысить вероятность ошибки. Очевидный плюс машинного обучения в данном случае заключается в том, что блок машинного обучения в данном случае становится неким страхующим звеном, при помощи которого можно покрыть те области, которые недоступны для анализа статическими правилами. Также Machine Learning позволит сократить ручной труд и повысить объективность оценки риска.

2. Данные в любой организации могут меняться с течением времени: создаются новые продукты, меняющие стиль поведения пользователей, появляются новые данные, старые данные теряют актуальность. Машинное обучение позволит вовремя обнаружить изменение в данных и сократить затраты на обновление правил. Таким образом, столкнувшись с какими-либо изменениями в данных компаниям необязательно сразу создавать новую систему правил.

3. Работа с большими данными также способствует использованию машинного обучения. Как правило, когда речь идет о транзакциях в финансовом секторе, их число может превышать миллионы. Методы Machine learning эффективны при больших объемах поступающей информации, так как снижается время на разбор операций для ручного анализа. Также решения на базе машинного обучения совершенствуются со временем, по мере обработки новых данных и обучении новой выборки.

4. Экспертами было отмечено, что использование машинного обучения способствует уменьшению ложноположительной ошибки, т.е. снижает риск неверного решения о блокировке транзакции, которая не является фродом. Например, пользователь совершает действия, которые похожи на мошеннические, однако в случае если для конкретного клиента это стандартная ситуация, то антифрод-система, благодаря данным машинного обучения, не разметит транзакцию как фрод. Также машинное обучение помогает в обратном случае: когда транзакция, с точки зрения локальных фильтров, не является подозрительной, но по нехарактерным для пользователя действиям понятно, что это злоумышленник. В этом случае антифрод обычно приостанавливает операцию для более детального разбора. Чем меньше вероятность ложноположительной ошибки, тем меньше трудозатрат на проверку и дальнейшие разбирательства с пользователем, которые могут повлиять на репутацию компании. Кроме того, в правилах сложно учитывать внезапные сезонные всплески или органические изменения поведения, которые алгоритмы машинного обучения способны находить и учитывать.

5. Машинное обучение использует более сложные и современные инструменты анализа, чем те, что используется в системе правил. Алгоритмы способны находить аномальные паттерны, которые сложно обнаружить ручным трудом специалистов. Результат работы машинного обучения совсем не обязательно будет определяющим – в правилах антифрода есть множество статичных критериев, по которым принимается решение. Тем не менее, результаты этой дополнительной проверки позволяют существенно повысить точность обнаружения мошенника.

## Особенности использования машинного обучения как составляющей антифрод-системы

На рис.2 представлена схема взаимодействия подсистем антифрод-сервиса.

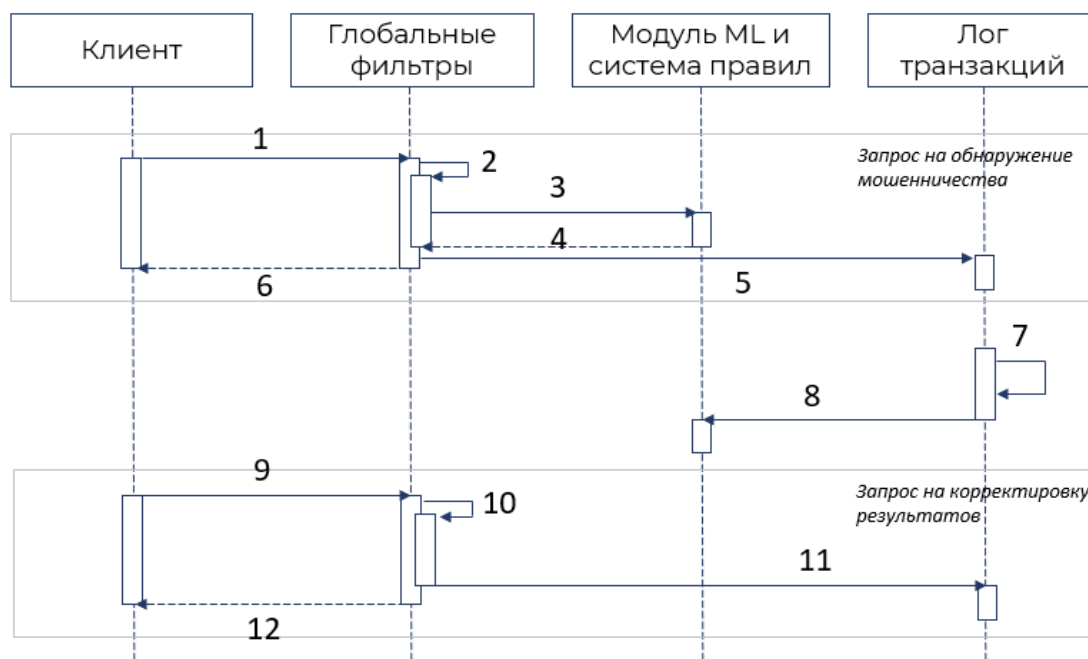


Рис. 2. Взаимодействие подсистем антифрод-сервиса  
*Fig. 2. Interaction of antifraud service subsystems*

На первом шаге происходит отправка запроса с информацией о платеже от пользователя.

На втором шаге запрос подвергается проверке через глобальные фильтры и валидность введенных платежных данных.

Далее при положительном вердикте на шаге 2 запрос проверяется через внутреннюю систему правил, разработанную специально для организации под ее характерные особенности. Также на третьем шаге модуль машинного обучения выносит решение на основе данных.

В результате на четвертом этапе выносится вердикт о статусе транзакции: успешно или заблокировано.

Финальный результат сохраняется в базе данных для дальнейшего обучения модели и возможности использования исторических данных для будущего анализа.

На шестом шаге пользователь получает ответ об исходе транзакции.

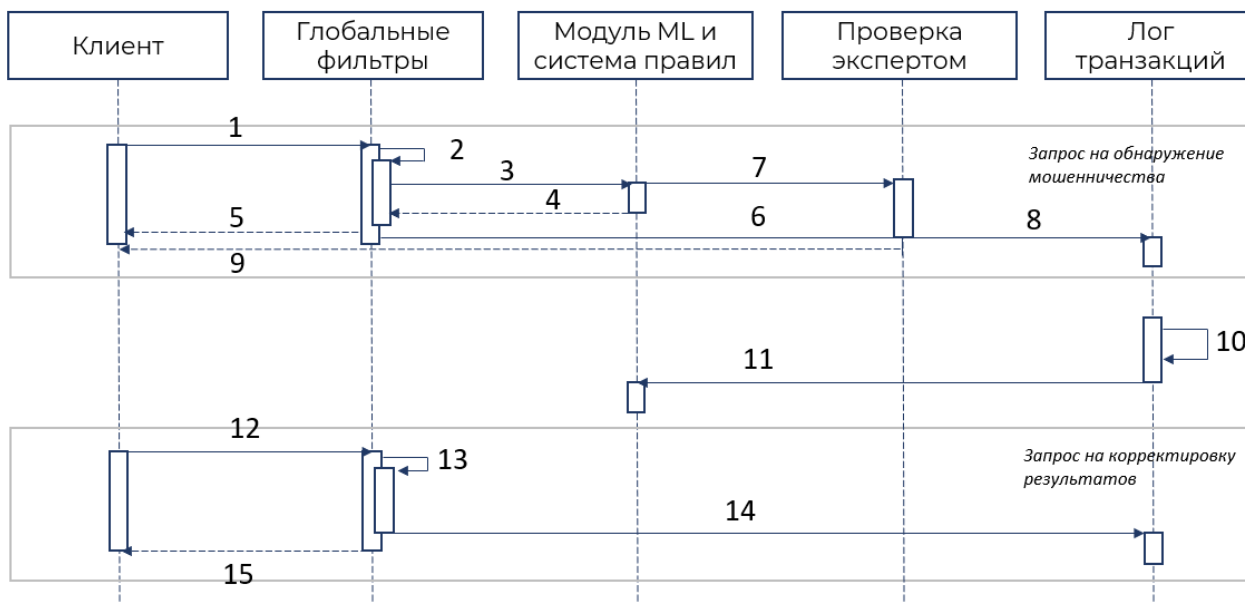
Далее происходит переобучение модели, обновление обучающей выборки.

Остальные (9 – 12) шаги опциональны: клиент в случае несогласия с вынесенным вердиктом может инициировать отправку запроса в техническую поддержку, где эксперт повторно анализирует результат на более глубоком уровне и принимает финальное решение о разблокировке или сохранении текущего статуса платежа.

На рис. 3 предложена схема взаимодействия подсистем с учетом дополнительной ручной проверки экспертом.

В данном случае добавлен еще один блок – проверка экспертом. В результате на четвертом этапе выносится вердикт о статусе транзакции: успешно или заблокировано до проверки специалистом. В случае, если подозрений о фроде нет, успешный статус транзакции отображается клиенту. Однако если система распознала операцию как фрод, то информация уходит к специалисту, который погружается в полученную от предыдущих блоков информацию (шаг 7) и принимает финальное решение. Результат проверки экспертом также сохраняется в хранилище транзакций и направляется пользователю, совершившему транзакцию. Дальнейшие шаги аналогичны процессу, изображенному на рис. 2.





**Рис. 3. Взаимодействие подсистем антифрод-сервиса с участием эксперта**  
**Fig 3. Interaction of anti-fraud service subsystems with the participation of an expert**

### Заключение

Для обеспечения защиты от мошеннических транзакций в информационной среде следует использовать антифрод-системы. На рынке существует множество предложений программного обеспечения с функционалом защиты от цифровых мошеннических действий. Организациям, внедряющим антифрод-систему, необходимо ответить на ряд вопросов перед принятием решения о покупке существующего на рынке коробочного решения или собственной разработке сервиса по обнаружению подозрительных транзакций.

Одним из факторов принятия решения будет выступать необходимость использования блока машинного обучения (МО). Последнее необходимо для увеличения точности нахождения подозрительных транзакций и сокращения числа ложноположительных ошибок. Другие преимущества МО заключаются в адаптивности к динамическому изменению внешних данных, использовании современных и сложных методов анализа данных, возможность применять расширенный аналитический функционал, недоступный при применении обычных статистических правил.

На основе данных о специфике организаций, их требований к полноте и тщательности анализа транзакционных операций на признаки фрода, предложены схемы взаимодействия всех подсистем антифрод-программы.

#### Список источников:

1. Окошкин А. Что интересует компании перед выбором антифрода: 10 главных вопросов. Anti-Malware. 2021.
2. Аминова Ю. Обзор систем противодействия банковскому мошенничеству (антифрод). Anti-Malware. 2019.
3. Сарычев Д. Выбор Антифрода, системы противодействия мошенничеству в финансовой сфере. Anti-Malware. 2021.
4. Ahramovich A. Machine Learning for fraud detection: essentials, use cases, and guidelines. Itransition. 2023.
5. Количество случаев хищения денег с банковских счетов сократилось впервые за 7 лет: итоги 2022 года, Банк России: официальный сайт. 2023. <https://cbr.ru/press/event/?id=14544>

#### References:

1. Okoshkin A. What Companies are Interested in Before Choosing an Antifraud: 10 Main Questions. Anti-Malware; 2021.
2. Amineva Yu. Review of Systems for Combating Bank Fraud (Anti-Fraud). Anti-Malware; 2019.
3. Sarychev D. Choice of Anifrod, a System for Combating Fraud in the Financial Sector. Anti-Malware; 2021.
4. Ahramovich A. Machine Learning for Fraud Detection: Essentials, Use Cases, and Guidelines. Itransition; 2023.
5. The Number of Cases of Theft of Money From Bank Accounts Has Decreased for the First Time in 7 Years: Results of 2022, Bank of Russia [Internet]. 2023. Available from: <https://cbr.ru/press/event/?id=14544>

6. Россияне сдали мошенникам рекордные ₺14млрд. РБК. 2023.

7. Копнин А.А., Соколова Е.В., Долгополов А.А. Методика обеспечения безопасности банковских интернет-транзакций на основе антифрод системы // International journal of professional science. 2022. №10.

8. Аксенов В.А. Роль и значение программного комплекса «Антифрод» как меры специально-криминологического характера в предупреждении мошенничества, совершенного с использованием информационно-телекоммуникационных технологий // Вестник Московского университета МВД России. 2021. №6 С.16-20.

9. Ивлиева Н.В. Актуальные проблемы противодействия хищениям денежных средств с банковских счетов физических лиц // Научный портал МВД России. 2019. №3 (47).

10. Ларионова С.Л., Ряховский Е.Э. Усовершенствование алгоритмов антифрод-системы на основе использования методов graph representation learning и сетей cyclegan // Инновации и инвестиции. 2021. №6.

11. Шавалаев Б.Э. Банковские меры противодействия преступлениям в сфере информационных технологий // Вестник Казанского юридического института МВД России. 2020. №2 (40).

12. Медведева М.Б., Васин М.М. Проблемы защиты от мошенничества в операциях с платежными картами в системе КБО физических лиц и развитие ее законодательного обеспечения // Финансовые рынки и банки. 2019. №1.

13. Радионова М.В., Корзухин А.А., Саушев Н.А. Математические методы оценки финансовых транзакций на предмет мошенничества // Вестник ПГУ. Серия: Экономика. 2021 №1.

6. Russians Handed Over a Record ₺14 Billion to scammers. RBC. 2023.

7. Kopnin A.A., Sokolova E.V., Dolgoplov A.A. Methodology for ensuring the security of banking Internet Transactions Based on an Antifraud System. International Journal of Professional Science. 2022;10.

8. Aksenov V.A. The Role and Significance of the Anti-Fraud Suite as a Special Criminological Measure to Prevent Fraud Committed Through the Use of Information and Telecommunication Technologies. Bulletin of the Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2021;6:16-20.

9. Ivlieva N.V. Actual Problems of Counteraction to Embezzlement of Money From Bank Accounts of Individuals. Scientific Portal of the Russia Ministry of the Interior. 2019;3(47).

10. Larionova S.L., Ryakhovsky E.E. Improvement of Anti-Fraud System Algorithms Based on the Use of Graph Representation Learning Methods and CycleGAN. Innovations and Investments. 2021;6.

11. Shavalaev B.E. Banking Measures to Combat Information Technology Crimes. Bulletin of the Kazan Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2020;2(40).

12. Medvedeva M.B., Vasin M.M. Problems of Protection Against Fraud in Operations with Payment Cards in the CBS System for Individuals and the Development of its Legislative Support. Financial Markets and Banks. 2019;1.

13. Radionova M.V., Korzukhin A.A., Saushev N.A. Mathematical Methods for Assessing Financial Transactions for Fraud. Vestnik PGU. Series: Economics. 2021;1.

#### **Информация об авторах:**

##### **Любовь Евгеньевна Батюкова**

аспирант Московского государственного технологического университета «СТАНКИН»

##### **Татьяна Владимировна Карлова**

доктор социологических наук, кандидат технических наук, профессор Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук

#### **Information about the authors:**

##### **Lyubov Evgenievna Batyukova**

Postgraduate student at Moscow State University of Technology «STANKIN».

##### **Tatyana Vladimirovna Karlova**

Doctor of Sociological Sciences, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 11.02.2024; одобрена после рецензирования 28.02.2024; принята к публикации 03.03.2024.**

**The article was submitted 11.02.2024; approved after reviewing 28.02.2024; accepted for publication 03.03.2024.**

**Рецензент** – Малаханов А.А., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

**Reviewer** – Malakhanov A.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.04

doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-65-72

## ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОННОЙ СРЕДЫ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ДОКУМЕНТООБОРОТА КАК КЛЮЧЕВОЙ ФАКТОР ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ

Антон Олегович Попов<sup>1</sup>, Татьяна Владимировна Карлова<sup>2</sup>, Сергей Александрович Шептунов<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Институт конструкторско-технологической информатики РАН, г. Москва, Россия

<sup>1</sup> kraz12345@mail.ru

<sup>2</sup> karlova-t@yandex.ru

<sup>3</sup> ship@ikti.ru

**Аннотация.** Проведлось исследование проблематики процесса оценки достоверности данных в электронной среде современной компании на основе моделей и алгоритмов интеллектуальной поддержки документооборота. Цель исследования в обосновании важности разработки методов и инструментария для реализации эффективного контроля достоверности данных, выявления ошибок и принятия необходимых решений для их выявления и устранения. Применены такие методы, как анализ существующих и разработка новых моделей и алгоритмов, тестирование на реальных данных. Результаты исследования применимы в разных отраслях деятельности современных предприятий, в которых ключевым аспектом деятельности выступает электронный документооборот, таких как финансовый и производственный сектор, питание и т.д.

**Ключевые слова:** управление, оценка, модели, документооборот, предприятия, алгоритмы, эффективность

**Для цитирования:** Попов А.О., Карлова Т.В., Шептунов С.А. Оценка достоверности данных электронной среды предприятия на основе моделей и алгоритмов интеллектуальной поддержки документооборота как ключевой фактор обеспечения эффективного управления предприятием // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №1 (23). С. 65-72. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-65-72.

Original article

Open Access Article

## ASSESSING THE RELIABILITY OF DATA IN THE ENTERPRISE ELECTRONIC ENVIRONMENT BASED ON MODELS AND ALGORITHMS FOR INTELLIGENT DOCUMENT MANAGEMENT SUPPORT AS A KEY FACTOR FOR EFFECTIVE ENTERPRISE MANAGEMENT

Anton O. Popov<sup>1</sup>, Tatyana V. Karlova<sup>2</sup>, Sergey A. Sheptunov<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Institute for Design-Technological Informatics RAS, Moscow, Russia

<sup>1</sup> kraz12345@mail.ru

<sup>2</sup> karlova-t@yandex.ru

<sup>3</sup> ship@ikti.ru

**Abstract.** A study is conducted on the problems of the process of assessing the reliability of data in the electronic environment of a modern company based on models and algorithms for intelligent document management support. The aim of the study is to substantiate the importance of developing methods and tools for implementing effective control of data reliability, identifying errors, and making necessary decisions to reveal and eliminate them.

---

---

*The authors apply such methods as the analysis of existing and developing new models and algorithms, testing on real data. The results of the research are applicable in various fields of modern enterprises operation, in which the key aspect of activity is electronic document management, such as the financial and production sectors, food, etc.*

**Keywords:** management, evaluation, models, document management, enterprises, algorithms, efficiency

**For citation:** Popov A.O., Karlova T.V., Sheptunov S.A. Assessing the Reliability of Data in the Enterprise Electronic Environment Based on Models and Algorithms for Intelligent Document Management Support as a Key Factor for Effective Enterprise Management. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 1 (23). pp. 65-72. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-65-72.

## Введение

Необходимость информатизации является важной составляющей развития современного предприятия. С быстрым развитием научно-технического прогресса информатизация стала для предприятий важным средством повышения конкурентоспособности и адаптации к требованиям рынка. Важным аспектом деятельности любой организации является документооборот, для управления которым применяется электронная среда. Постоянный рост объемов информации реализуемой в электронной среде поставил под угрозу обеспечение достоверности данных, что является критически важным фактором для эффективного управления предприятием.

С ускорением темпов информатизации предприятий большое количество электронных документов превратилось в особый ключевой актив как носитель информации, а легкость распространения и разрастания электронных документов определяет их небезопасность. В настоящее время внутренняя утечка преимущественно электронных документов становится одной из самых серьезных угроз безопасности данных, а главная скрытая опасность информационной безопасности постепенно переходит от внешнего вторжения к неконтролируемости использования информации внутренним персоналом.

Актуальность исследования проблематики современного процесса оценки достоверности информации в электронной среде обусловлена постоянным ростом значимости и уровня взаимодействия данных с электронной средой современного предприятия. За последние годы значительно возросли объемы информации, которая генерируется в деятельности предприятий, что подчеркивает высокий уровень значимости, как в обеспечении достоверности информации, так и при принятии обоснованных управленческих решений.

Цель исследования в подробном рассмотрении возможности применения интеллектуальной поддержки при организации и реализации документооборота и оценки достоверности данных в нем.

В соответствии с целью сформулированы следующие задачи:

- проанализировать требования необходимые для оценки достоверности данных через рассмотрение существующих методов и подходов, выявление необходимых требований к разработке интеллектуальной системы поддержки документооборота;
- описать и разработать пример математической модели оценки достоверности;
- разработать на основании математической модели алгоритм, который будет применим для оценки достоверности данных;
- оценить эффективность разработанной системы документооборота и сформулировать вывод.

## Методология исследования

В настоящее время множество компаний все больше и больше стремится к стандартизации, зрелости, планомерному развитию, предприятия при раскрытии бухгалтерской информации обнаруживают множество недостатков, что серьезно препятствует здоровому и благотворному развитию [1].

Бухгалтерская информация относится к количественной информации финансовых данных, формируемой на предприятии, и ее основные характеристики могут быть кратко изложены следующим образом: во-первых, она относится к информации, отражающей изменение стоимости в хозяйственной деятельности предприятия, и может отражать фондовые переменные в экономических взаимодействиях предприятия. Во-вторых, бухгалтерская информация неразрывно связана с другой информацией предприятия, и предприятие может наблюдать основу и носитель информации о других предприятиях с помощью мероприятий по информационному анализу. В-третьих, бухгалтерская информация может быть проанализирована предприятием для обеспечения основы для принятия управленческих решений и уменьшения слепоты в принятии управленческих решений.

Бухгалтерская информация играет важную роль в управлении предприятием, поэтому подлинность и достоверность информации имеет большое значение для управления предприятием. К экономической информации относится вся количественная информация, связанная с экономическими проблемами в широком смысле, бухгалтерская информация также относится к разновидности экономической информации, поэтому бухгалтерская информация предприятия включается в экономическую информацию. Развитие и совершенствование методологии исследования статистики экономической информации также предоставит возможности для развития и совершенствования управления бухгалтерской информацией на предприятиях [2].

Развитие современной экономики позволило усовершенствовать и усилить методы статистического учета и анализа бухгалтерской информации предприятия, что обеспечивает большую техническую поддержку правдивости и точности информации в работе по раскрытию бухгалтерской информации предприятия [3]. При традиционных методах учета из-за информационной асимметрии между предприятием и внешними заинтересованными сторонами при раскрытии информации предприятия часто возникают проблемы с правдивостью, эффективностью, своевременностью, но с развитием современной экономики работа по раскрытию бухгалтерской информации предприятия имеет все больше технологических средств и передовых инструментов, так что раскрытие бухгалтерской информации предприятия достигает более высокого уровня правдивости, точности, своевременности, следовательно и экономическая работа по раскрытию информации достигает более высокого уровня правдивости, точности и своевременности. С развитием современной экономики у предприятий появляется все больше технических средств и передовых инструментов, позволяющих достичь более высокого уровня правдивости, точности и своевременности раскрытия бухгалтерской информации, поэтому развитие экономики дает возможность оптимизировать методы раскрытия бухгалтерской информации и позволяет повысить качество раскрытия бухгалтерской информации за счет внедрения передовых теорий и технических мер в области экономики. С непрерывным развитием сетевых технологий и информационных технологий элементы науки и техники постепенно проникают в экономику, что приводит к появлению большого количества новых методов и способов исследования, а модернизация и развитие методологических теорий экономики также дает возможность обновить методы учета в области бухгалтерского учета. По мере того как экономические проблемы предприятий становятся все более сложными, а анализ данных и статистика – все более трудными, традиционные методы учета уже не могут удовлетворять потребностям развития современной учетной практики, поэтому возникает острая необходимость внедрения передовых средств экономики для оптимизации и модернизации методов учета. Бухгалтерский учет в основном занимается статистикой, учетом, анализом и управлением финансовой информацией на предприятии, а его практическая деятельность заключается в управлении количественной финансовой информацией, собираемой финансовым отделом предприятия [4].

Для проверки достоверности данных в системе электронного документооборота предприятия применима система процедур связанных между собой, они нацелены на

обеспечение полного цикла движения документооборота от момента создания до момента его удаления. Информатизация процессов общества подчеркивает значимость электронной среды в организации в контексте управления данными.

Для исследования оценки достоверности данных электронной среды предприятия на основе моделей и алгоритмов интеллектуальной поддержки в качестве исходных данных рассматриваются документы, которые прошли все процессы согласования и входят в перечень исходных данных для оценки достоверности. Сами источники данных должны быть надежными. Важно установить процессы, которые нацелены на достоверность данных через проверку надежности информации и минимизацию потенциальных рисков. В целях контроля реализуется проведение ИТ-аудита.

Что касается интеллектуальных алгоритмов, они активно применяются при оценке достоверности данных и гарантируют наиболее точный результат. Алгоритмы оценки достоверности следует интегрировать в систему документооборота предприятия, что позволит повысить эффективность работы с данными и упростит процесс их проверки. При оценке достоверности данных в электронной среде предприятия обосновано применение интеллектуальных алгоритмов, для обеспечения надёжности и точности данных.

Каждая организация имеет свои особенности в связи с чем отсутствует возможность формализации данного процесса. В связи с этим в качестве примера мы рассмотрим математическую модель проверки корректности отображения обмена товара между складами организации. Равенство суммы стоимости отправленного с одного склада и полученного на другом складе товара позволяет утверждать, что взаимодействие между складами отображено в документах, и как следствие в данных, корректно.

Модель проверки корректности отображения обмена товарами:

– переменные:  $A$  – уникальный код склада отправителя;  $B$  – уникальный код склада получателя;  $X$  – количество товара при транспортировке;  $C$  – стоимость товара;  $n$  – код товара;

– ограничения:  $X \geq 0$ : количество товара не может быть отрицательным;

– Функция цели: оценка достоверности данных;

Математическая модель:

$$\sum_n (Xn[A]*Cn[A]) = \sum_n (Xn[B]*Cn[B])$$

При разработке алгоритма следует обозначить тот факт, что по причине удобства использования при хранении данных в организациях применяется реляционный тип базы данных. В процессе внесения информации в базу, происходит её распределение по соответствующим таблицам.

В нашем случае в наличии две таблицы:  $C$  – полученный товар,  $D$  – отправленный товар. Возьмём за основу тот факт, что товар поступал на следующий склад, в который убывал из предыдущего. Также помимо перечисленных в математической модели выше переменных обозначим переменные  $Q$  – номер документа у получателя,  $P$  – номер документа у отправителя,  $F$  – дата документа.

Алгоритм:

– Необходимо ограничить обе таблицы ( $C$ ,  $D$ ) анализируемым периодом;

– Необходимо соотнести записи в таблицах, используя для идентификации уникальный ключ. В данном случае полагаем, что индивидуальный ключ состоит из столбцов даты, стоимости, кол-во товара, отправителя и получателя, номера документов отправителя и получателя;

– Необходимо идентифицировать номера документов, записи по которым в обеих таблицах не совпали, если таковые имеются. Если таких документов нет, проверка считается пройденной;

– По идентифицированным документам необходимо вывести предупреждение об отсутствии этих документов, а также кол-во (либо суммы, указанной в документе) в одной из таблиц без указания конкретной таблицы;

- Необходимо проанализировать полученные предупреждения и выполнить необходимые действия для корректировки данных;
- Запустить алгоритм проверки повторно.

Проведённое исследование реализовано для оценки достоверности данных, которые хранятся и обрабатываются в электронной среде предприятия. Для этой цели применимы модели и алгоритмы интеллектуальной поддержки документооборота.

Выше приведена часть алгоритма по проверке корректности отображения информации о передаче товаров между складами. Так же как в приведённом примере, интеллектуальные процессы оценки полноты данных выступают продуктом автоматизации ручных проверок, которые были реализованы ранее и были автоматизированы впоследствии.

### **Результаты исследования и обсуждение**

По результатам внедрения реализована проверка предыдущих периодов в рамках одного финансового года, что позволило выявить ряд расхождений, которые не учтены ранее.

Помимо этого выявлены риски, которые не были определены предыдущими проверками. Таким риском явилось несоблюдение ведения регламентированного учёта документов.

Внедрение алгоритма оценки достоверности данных оказала положительное воздействие на решение целого ряда проблем [5]:

1. Исключена вероятность искажения данных результатов оценки полноты данных, в связи с исключением человеческого фактора при расчете.
2. Существенно сократилось время для проведения оценки полноты данных.
3. Появилась возможность более полно описывать негативные случаи (например: при выявлении расхождений выводить номер документа и сумму расхождения), что повлияло на скорость и точность проведения необходимых действий по устранению таких случаев.

В связи с наличием расхождений, а также сравнения при оценке ручной проверки и автоматизированной было определено значительное преимущество автоматизированной проверки.

В виду невозможности формализации данного процесса, в связи с необходимостью учитывания особенностей каждого отдельного учреждения, мы можем определить подход, который позволит гибко рассматривать внедрение алгоритмов для оценки полноты данных, а именно [6]:

- определить критически значимые точки в ведении документооборота на основании необходимости соблюдения требований, законодательства, прочих факторов;
- разработать и описать руководство оценки полноты данных по значимым точкам;
- на основании руководства описать алгоритм оценки полноты данных;
- на основании алгоритма разработать техническую реализацию данного процесса, интегрировать техническую реализацию в системы электронного документооборота;
- внести изменения в соответствующую документацию при необходимости.

Информатизация современного общества подчеркивает значимость применения электронной среды для обеспечения эффективности деятельности предприятий. При этом, как было рассмотрено, рост объемов данных актуализирует проведение оценки достоверности этих данных.

Сегодня предприятия всё активнее применяют в своей деятельности информационные технологии как для управления, так и для роста эффективности.

Оценка достоверности данных в электронной среде предприятия – это сложная задача, в реализации которой необходимы специальные модели и алгоритмы. В статье мы затронули применение подхода интеллектуальной поддержки документооборота через применение методов машинного обучения и иных алгоритмов, направленных на автоматизацию проверки и фильтрации данных.

Применение моделей и алгоритмов интеллектуальной поддержки документооборота в целях оценки достоверности данных предприятия обусловлено целым рядом преимуществ. Это даёт возможность автоматизировать процесс проверки данных, а значит и уменьшить процент потенциальных ошибок. Модели и алгоритмы могут обучаться на базе исторических данных, что позволяет улучшать их точность.

Помимо этого применение интеллектуальной поддержки документооборота даёт возможность оперативного реагирования на изменение данных и оперативно адаптироваться к изменившейся ситуации.

Оценка достоверности данных электронной среды предприятия – это ключевой фактор обеспечения эффективного управления. Использование модели и алгоритмов интеллектуальной поддержки документооборота оказывает положительное воздействие на процесс автоматизации оценки достоверности данных и улучшает качество управленческих решений.

Модели интеллектуальной поддержки документооборота могут включать в себя различные аспекты, такие как автоматизация процессов, анализ и классификация документов, обнаружение и предотвращение мошенничества, а также обеспечение безопасности и конфиденциальности информации. Разработка таких моделей требует учета специфических потребностей и требований каждой организации, а также использования передовых технологий и методик, таких как машинное обучение, нейронные сети и анализ данных. Выводы исследования подтверждают значимость организации аудита систем современного документооборота и систем, обеспечивающих надежность электронной среды предприятия. Оценка достоверности данных является ключевым фактором для эффективного управления предприятием и принятия обоснованных решений. Разработка моделей интеллектуальной поддержки документооборота может значительно улучшить эти процессы, обеспечивая автоматизацию, анализ и безопасность данных.

Важно понимать тот факт, что модели и алгоритмы постоянно обновляются и адаптируются, что подчёркивает удобство их использования в изменчивой информационной среде. Они позволяют исключить такие риски, как человеческий фактор, уменьшают временные затраты. Важен гибкий подход в случае переменчивости требований, однако польза применения данных алгоритмов обусловлено тем фактом, что на основании проведённой оценки существует возможность доверять данным и в случае необходимости устранять проблемы и недостатки.

## **Выводы**

По результатам исследования была подтверждена важность проведения аудита систем современного документооборота и систем, отвечающих за обеспечение надежности электронной среды предприятия. Оценка достоверности данных является ключевым фактором для эффективного управления предприятием и принятия обоснованных решений. Надежность электронной среды и надежность данных в ней играют решающую роль в обеспечении корректности и достоверности информации, которая используется для анализа и принятия решений. Проведение аудита позволяет выявить потенциальные проблемы и уязвимости в системе, а также предложить рекомендации по их устранению и повышению общей надежности системы. Таким образом, организация аудита систем современного документооборота и систем обеспечения надежности электронной среды является неотъемлемой частью эффективного управления предприятием и принятия обоснованных решений.

### **Список источников:**

1. Ганчерёнок И.И., Горбачев Н.Н., Турсунов И.Э. Цифровая экономика: управление информационными ресурсами // Т.: ИД «Ворис». – 2020.

### **References:**

1. Gancheryonok I.I., Gorbachev N.N., Tursunov I.E. Digital Economy: Information Resource Management. Tashkent: Voris; 2020.



2. Зульфакарова Л.Ф., Маркова С.В. Эффекты цифровых технологий в современной институциональной среде //Кластеризация цифровой экономики: теория и практика. – 2020. – С. 165-210.
3. Нечеухина Н.С., Полозова Н.А., Буянова Т.И. Контроллинг как механизм успешной трансформации промышленности в цифровую экономику //Цифровая трансформация экономики и промышленности: проблемы и перспективы. – 2017. – С. 256-277.
4. Прокопчина С.В. Мягкие измерения: методология и применение в научных, технических и социальноэкономических задачах цифровой экономики //Мягкие измерения и вычисления. – 2018. – №. 9. – С. 4-33.
5. Трофимов В. и др. Информационные системы и технологии в экономике и управлении в 2 ч. Часть 1. 5-е изд., пер. и доп. Учебник для академического бакалавриата. – Litres, 2022.
6. Устинова Л.Н. Цифровые технологии в управлении интеллектуальными ресурсами и инновационной деятельностью предприятий // Цифровая трансформация экономики и промышленности: проблемы и перспективы. – 2017. – С. 509-532.
7. Золкин А.Л., Тормозов В.С. Принципы построения и внедрения интегрированной системы электронного документооборота // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2022. – С. 41-48.
8. Игнатенко Н.С. Крохичева Г.Е. Электронный документооборот в бухгалтерском учете // KANT. – 2019. – С. 69-72.
9. Федяйнова В.И., Сысо Т.Н. Электронный документооборот: технология внедрения и способ оптимизации бизнес-процедур // Вестник Омского университета. Серия «Экономика». – 2012. – С. 36–44.
10. Баранова О.В. Аудит информационных систем // Вестник финансовой Академии. – 2009. – С. 58-60.
11. Мицель А.А., Панков И.И., Щербakov А.И. Система управления информационно-образовательной средой экономико-правового вуза // Журнал «Доклады ТУСУР». – 2007. – С. 106-111.
12. Скузатова О.Г. Информационные технологии и информационно-технологические системы в управлении региональными экономическими комплексами // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета - 2004 - С. 94-98.
2. Zulfakarova LF, Markova SV. The Effects of Digital Technologies in the Modern Institutional Environment. In: Clustering of the Digital Economy: Theory and Practice; 2020. p. 165-210.
3. Necheukhina N.S, Polozova N.A., Buyanova T.I. Controlling as a Mechanism for the Successful Transformation Industry in the Digital Economy. In: Digital Transformation of the Economy and Industry: Problems and Prospects; 2017. p. 256-277.
4. Prokopchina S.V. Soft Measurements: Methodology and Application in Scientific, Technical and Socio-Economic Problems of the Digital Economy. Soft Measurements and Computing. 2018;9:4-33.
5. Trofimov V, et al. Information Systems and Technologies in Economics and Management in 2 Parts. Part 1. 5th ed. Litres; 2022.
6. Ustinova LN. Digital Technology in the Management of Intellectual Resources and Innovative Activity of the Enterprises. In: Digital Transformation of the Economy and Industry: Problems and Prospects; 2017. p. 509-532.
7. Zolkin A.L., Tormozov V.S. Principles for the Construction and Implementation of an Integrated Electronic Document Management System. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(1):41-48.
8. Ignatenko N.S. Krokhicheva G.E. Electronic Document Flow in Accounting. KANT. 2019;4(33):69-72.
9. Fedyainova V.I., Syso T.N. Electronic Document Flow: Implementation Technology and Optimisation Process of Business Procedures. Herald of Omsk University. Series “Economic”. 2012;4:36-44.
10. Baranova O.V. Auditing Information Systems. Vestnik of the Finance Academy. 2009;1(49):58-60.
11. Mitsel A.A., Pankov I.I., Shcherbakov A.I. Management System for the Information and Educational Environment of an Economics and Law University. Proceedings of TUSUR University. 2007:106-111.
12. Skuzatova O.G. Information Technologies and Information Technology Systems in the Management of Regional Economic Complexes. Vestnik of Orenburg State Pedagogical University. 2004:94-98.

### **Информация об авторах:**

#### **Попов Антон Олегович**

аспирант института конструкторско-технологической информатики РАН

#### **Карлова Татьяна Владимировна**

доктор социологических наук, кандидат технических наук., профессор института конструкторско-технологической информатики РАН

#### **Шептунов Сергей Александрович**

доктор технических наук, профессор института конструкторско-технологической информатики РАН

### **Information about the authors:**

#### **Popov Anton Olegovich**

Postgraduate student at the Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences

#### **Karlova Tatyana Vladimirovna**

Doctor of Sociological Sciences, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences

#### **Sheptunov Sergey Alexandrovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor at the Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 16.01.2024; одобрена после рецензирования 11.02.2024; принята к публикации 14.02.2024.**

**The article was submitted 16.01.2024; approved after reviewing 11.02.2024; accepted for publication 14.02.2024.**

**Рецензент** – Малаханов А.А., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

**Reviewer** – Malakhanov A.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.8

doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-73-80

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕР И СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ В СФЕРЕ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

Кирилл Андреевич Седаков<sup>1✉</sup>, Михаил Юрьевич Рытов<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

<sup>1</sup>sekira98@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9284-4624>

<sup>2</sup>ozikts@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0023-6345-5564>

**Аннотация.** Рассмотрены особенности существующих направлений и методов оценки эффективности мер защиты информации в медицинских учреждениях. Проведен комплексный анализ объектов и выявления угроз безопасности персональных данных. Установлены ключевые этапы исследования объектов, состоящие в определении стоимости информационных ресурсов, определении наиболее актуальных угроз и расчета ущерба от их применения. Выполнены анализ возможности реализации и устранения угроз, построена классификация наиболее критичных групп угроз. Основной научный результат выполненного исследования состоит в том, что применение данного алгоритма возможно, как в научных целях, так и для формирования эффективных систем защищенности персональных данных в различных организациях. Исходя из этого, данное исследование приведет к повышению уровня оценки эффективности мер защиты конфиденциальной информации в медицинских организациях.

**Ключевые слова:** оценка эффективности информационной безопасности, категорирование уровня эффективности мер и средств конфиденциальной информации

**Для цитирования:** Седаков К.А., Рытов М.Ю. Разработка алгоритма оценки эффективности мер и средств защиты персональных данных // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №1 (23). С. 73-80. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-73-80.

Original article

Open Access Article

## DEVELOPING AN ALGORITHM FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF MEASURES AND MEANS OF PERSONAL DATA PROTECTION IN THE HEALTHCARE SECTOR

Kirill A. Sedakov<sup>1✉</sup>, Mikhail Yu. Rytov<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup>Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup>sekira98@mail.ru<sup>✉</sup>, <https://orcid.org/0009-0002-9284-4624>

<sup>2</sup>ozikts@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0023-6345-5564>

**Abstract.** The features of existing directions and methods for assessing the effectiveness of information protection measures in medical institutions are considered. A comprehensive analysis of objects and identifying threats to the security of personal data is carried out. The authors identify key stages of the object research, consisting of determining the cost of information resources, identifying the most relevant threats, and calculating the damage from their application. The analysis of the possibility of implementing and eliminating threats is performed; a classification of the most critical threat groups is built. The main scientific result of the performed research states that this algorithm application is possible both for scientific purposes and for forming effective personal data protection systems in various organizations. Based on this, this study will lead to increasing the level of the effectiveness assessment for the protection measures of confidential information in medical organizations.

**Keywords:** effectiveness assessment of information security, categorizing the effectiveness level of measures and means of confidential information

**For citation:** Sedakov K.A., Rytov M.Yu. Developing an Algorithm for Assessing the Effectiveness of Measures and Means of Personal Data Protection in the Healthcare Sector. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 1 (23). pp. 73-80. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-73-80.

## Введение

На данный момент в информационном обществе важно обеспечить защиту информации от различных угроз и рисков. Каждый день мы сталкиваемся с новыми угрозами, связанными с хакерскими атаками, вирусами, кражей данных и другими событиями, которые могут нанести серьезный ущерб деловой репутации и потерю конфиденциальной информации. Поэтому актуальность разработки и применения эффективных методов оценки информационной безопасности никогда не была такой высокой.

## Материалы исследования

В современном обществе угрозам информационной безопасности подвержен не только каждый человек, но и каждая организация, медицинские организации в том числе [1, 7, 12]. Оценка уровня реализуемости угроз безопасности информации не является исключением и для организаций медицинского назначения, так как в данных учреждения обрабатывается информация конфиденциального характера. В последнее время на медицинскую инфраструктуру увеличивается количество хакерских атак. Интерес к медицинским учреждениям для нарушителей объясняется тем, что в информационных системах обрабатывается большое количество информации конфиденциального характера, включая различные медицинские сведения, личные данные пациентов, номера банковских карт. Обработка персональных медицинских данных является важным аспектом в сфере здравоохранения. Защита конфиденциальности этих данных является не только юридическим требованием, но и этической обязанностью организаций, работающих с медицинской информацией. Для обеспечения достаточной безопасности персональных медицинских данных необходимо осуществлять организационные и технические мероприятия. В данной статье будет рассмотрен анализ существующих организационных и технических мероприятий, а также предложения по их усовершенствованию [4, 11].

В 2022 году здравоохранение стало самой атакуемой сферой, доля медицинских учреждений в статистике жертв преступников постоянно увеличивалась: с 8 % в 1 квартале до 12 % в конце года. По данным исследования PositiveTechnologies, преступники чаще всего похищали персональные данные клиентов и сотрудников, а именно 39 % от общей доли похищенных данных. Помимо персональных данных, также хищению подвергалась и медицинская информация, общая доля похищенной информации которой составляла 36 % [2, 6].

В медицинских организациях похищенную информацию могут использовать для различных целей:

1. Финансовые. Использование данной информации в фальсификационных банковских действиях.
2. Идентификационные. Использование украденной информации для получения поддельных удостоверений личности. Помимо этого, использовать данную информацию для взлома учетных записей пациентов на различных онлайн платформах.
3. Медицинские. Использование медицинской информации для получения медицинских услуг или препаратов на имя другого человека, оставляя счета и ответственность за оплату на пострадавшего.
4. Вымогательские. Шантаж медицинской организации или пациента для получения выкупа.
5. Социальный инжиниринг. Использование данных для получения дополнительных данных и доступа к системе у пациента.
6. Сбор персональных данных. Сбор информации для спама и мошеннических сообщений [8, 9].

Кроме нормативно-правовых актов (НПА) регулятора Министерство здравоохранения выпустило внутренние НПА, в которых содержатся требования к государственным информационным системам в сфере здравоохранения (все информационные системы персональных данных (ИСПДн) медицинского назначения являются таковыми) и методические рекомендации по защите медицинских информационных систем (МИС).

Согласно этим рекомендациям, оценочные мероприятия при определении актуальных

---

---

угроз безопасности предлагается производить экспертным методом, что не всегда возможно и приемлемо для ИСПДн медицинского назначения. Сотрудники, привлекаемые в качестве экспертов, могут не обладать необходимой квалификацией при оценке угроз, также оценка может иметь субъективный характер. Согласно статистическим данным в сфере здравоохранения только в 29 % случаев ИС их защитой занимаются профильные специалисты, а выделенные отделы информационной безопасности существуют только в 10 % медицинских организаций. Особенно эти проблемы актуальны при создании ИСПДн медицинского назначения для отдельных медицинских учреждений [3, 5].

Обработка персональных медицинских данных является важным аспектом в сфере здравоохранения. Защита конфиденциальности этих данных является не только юридическим требованием, но и этической обязанностью организаций, работающих с медицинской информацией. Для обеспечения достаточной защищенности персональных медицинских данных необходимо осуществлять организационные и технические мероприятия, но для этого необходимо оценивать эффективность защиты персональных данных в различных организациях, с помощью которого можно рассчитать показатель эффективности наборов контрмер для снижения риска утечки персональных данных [6, 10].

### Алгоритм оценки эффективности мер и средств защиты персональных данных

Разработанный алгоритм оценки эффективности мер и средств защиты персональных данных в медицинских организациях предложен на рис. 1.



**Рис. 1. Алгоритм оценки эффективности мер защиты персональных данных**  
*Fig. 1. Algorithm for evaluating the effectiveness of personal data protection measures*

Главным преимуществом предложенного алгоритма является возможность оценки уровня остаточного риска от практической реализации разработанного набора контрмер и расчета степени влияния конкретных средств и методов защиты на общую защищенность организации сферы здравоохранения. Для определения оценки риска синтезирован алгоритм оценки ущерба от нарушения свойств защищенности, который базируется на экспертно-статистической оценке, особенностью которого является использование метода прогнозного графа. Алгоритм позволяет определять качественную и количественную оценку возможного ущерба персональным данным.

1. *Определение и оценка персональных данных.* На начальном этапе оценки эффективности средств защиты персональных данных в рамках определенной организации

сферы здравоохранения, необходимо выполнить анализ максимального финансового ущерба от реализации угроз целостности, доступности и конфиденциальности (размер штрафов, вызванных нарушением требований, действующих нормативно-правовых актов, а также стоимость восстановления информации при появлении деструктивных последствий). В результате выполнения данного этапа должны быть сформированы расчетные показатели, стоимости утечки персональных данных не только клиентов (пациентов), но и сотрудников данного учреждения. Данные показатели должны обрабатываться на объекте с учетом суммы наносимого ущерба, стоимости их восстановления и ряда других показателей.

2. *Анализ и формирование групп угроз безопасности информации.* На втором этапе нужно определить актуальные угрозы и выявить вероятность реализации угрозы. Помимо этого, в рамках работы на данном этапе должны быть сформированы группы угроз, чтобы определить степень вариативности реализации угроз.

При анализе угроз из состава банка данных угроз (БДУ) ФСТЭК необходимо производить систематизацию перечисленных угроз. Подробная систематизация выполнена в работе [4].

Анализ результатов работы и ряда других источников позволил ранжировать данные о частоте возникновения различных угроз безопасности информации (УБИ) для медицинских учреждений (табл. 1).

Таблица 1

**Наиболее частые УБИ в медицинских учреждениях**

Table 1

*Most common UBIs in health care settings*

|         | Наименование УБИ   | Частота угрозы в % | Частота угрозы средняя в % |
|---------|--|--------------------|----------------------------|
| УБИ.006 | Угроза внедрения кода или данных   | 52...92            | 72                         |
| УБИ.030 | Угроза использования информации идентификации/аутентификации, заданной по умолчанию                                  | 50...87            | 69                         |
| УБИ.050 | Угроза неверного определения формата входных данных, поступающих в хранилище больших данных                          | 48...69            | 59                         |
| УБИ.052 | Угроза невозможности миграции образов виртуальных машин из-за несовместимости аппаратного и программного обеспечения | 48...59            | 52                         |
| УБИ.057 | Угроза неконтролируемого копирования данных внутри хранилища больших данных  | 46...87            | 67                         |
| УБИ.063 | Угроза некорректного использования функционала программного и аппаратного обеспечения                                | 50...89            | 70                         |
| УБИ.067 | Угроза неправомерного ознакомления с информацией   | 62...100           | 81                         |
| УБИ.088 | Угрозы несанкционированного копирования данных   | 46...92            | 69                         |
| УБИ.135 | Угроза потери и утечки данных, обрабатываемых в облаке   | 48...69            | 59                         |
| УБИ.138 | Угроза потери управления собственной инфраструктурой при переносе её в облако  | 48...59            | 52                         |
| УБИ.140 | Угроза приведения системы в состояние «отказ в обслуживании» (DOS)   | 46...87            | 67                         |
| УБИ.156 | Угроза утраты носителей информации   | 62...100           | 81                         |
| УБИ.164 | Угроза распространения состояния «отказ в обслуживании» в облачной инфраструктуре                                    | 67...83            | 75                         |
| УБИ.167 | Угроза заражения компьютера при посещении неблагонадежных сайтов   | 50...87            | 69                         |
| УБИ.168 | Угроза «кражи» учетной записи доступа к сетевым сервисам   | 48...69            | 59                         |
| УБИ.170 | Угроза неправомерного шифрования информации  | 38...69            | 47                         |
| УБИ.172 | Угроза распространения «почтовых червей»   | 46...87            | 67                         |
| УБИ.175 | Угроза «фишинга»   | 62...100           | 81                         |
| УБИ.179 | Угроза несанкционированной модификации защищаемой информации   | 67...83            | 75                         |
| УБИ.197 | Угроза хищения аутентификационной информации из временных файлов cookie  | 67...100           | 83                         |

3. *Определение параметров риска для каждой группы угроз.* Осуществление дифференциации групп угроз и выделение критичной группы угроз на основании параметров:  $k_i$  – ответ на  $i$  вопрос опросника,  $a_i$  – коэффициент важности, определяющийся экспертным методом и удовлетворяющий условию (1).

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1. \quad (1)$$

4. *Оценка вероятности реализации выявленных угроз.* Оценка вероятности реализации выявленных угроз проводится экспертным методом (2).

$$V_{ry} = \sum_{i=1}^n k_i \cdot a_i. \quad (2)$$

Определение вероятности реализации определенной угрозы рассмотрим на примере угрозы УБИ.067 «Угроза неправомерного ознакомления с информацией» (табл. 2).

Таблица 2

**Пример определения возможности реализации УБИ. 067**

Table 2

*An example of determining the possibility of implementing UBI. 067*

| № угрозы | Название угрозы безопасности информации          | Уязвимости   | $k_i$ | Коэффициент важности $a_i$ | Возможность реализации угрозы $V_r$ |
|----------|--|--|-------|----------------------------|-------------------------------------|
| УБИ.067  | Угроза неправомерного ознакомления с информацией | Не назначен администратор ИБ / управление ИБ для регулярной проверки логов (системных событий) | 0     | 0,4                        | 0,4                                 |
|          |  | Установлена многофакторная аутентификации для DNS-сервера                                      | 1     | 0,4                        |                                     |
|          |  | Переговорные не проходили аттестацию (проходили более 5 лет назад)                             | 0     | 0,2                        |                                     |

$V_r$  на пример УБИ.067 вычисляется следующим образом:

$$V_r = (0 \cdot 0,4) + (1 \cdot 0,4) + (0 \cdot 0,2) = 0,4.$$

5. *Определение средней вероятности реализации угроз.* Следующим этапом является определение среднего значения возможности реализации угроз:

$$V_{ry} = \frac{Vr1+Vr2+\dots+Vrn}{Ny} \cdot 100 \quad (3)$$

где  $V_{ry}$  – среднее значение возможности реализации угроз;  $N_y$  – общее количество угроз, выявленных для данной организации.

В заключении данного этапа необходимо перевести количественный средний показатель возможности реализации угрозы ( $V_{ry}$ ) в качественный показатель возможности возникновения угрозы (ПВВУ): 0...40 ( $V_{ry}$ ) – показатель «низкий» (ПВВУ); 41...70 ( $V_{ry}$ ) – показатель «средний» (ПВВУ); 71...100 ( $V_{ry}$ ) – показатель «высокий» (ПВВУ).

Приведенное преобразование от количественного показателя к качественному продиктовано необходимостью расчета риска в соответствии с матрицей, представленной в табл. 3. В матрице все значения для определения уровня эффективности мер защиты информации определены по качественным показателям. В рамках данного этапа должна сформироваться группа угроз и показатель вероятности реализации угроз безопасности персональных данных. Таким образом, это позволяет определить необходимые контрмеры, для минимизации этого риска.

6. *Определение коэффициента риска информационной безопасности.* На шестом этапе проводится оценка степени критичности групп угроз. Этот показатель можно рассчитать с помощью значения коэффициента риска (4).

$$K_d = \frac{V_{ry}}{N_y}, \quad (4)$$

где  $K_d$  – коэффициент риска;  $b$  – последствия от реализации угрозы (ценность актива);  $N_y$  – количество определенных угроз.

7. *Оценка уровня риска информационной безопасности.* В рамках данного этапа должен быть определен показатель уровня риска ИБ. Показатель уровня риска информационной безопасности « $Y_r$ » – определяет будет ли реализована угроза в данном медицинском

учреждении с учетом вероятности реализации угрозы и уровня коэффициента риска информационной безопасности. Данное значение рассчитывается по формуле (5).

$$Y_r = \frac{V_{ry} + K_d}{2} \quad (5)$$

где  $Y_r$  – уровень риска информационной безопасности,  $0 \leq Y_r \leq 50$ ;  $V_{ry}$  – возможность реализации угрозы,  $0 \leq V_{ry} \leq 100$ ;  $K_d$  – коэффициент риска,  $0 \leq K_d \leq 10$ .

После расчета  $Y_r$  будут получены количественные оценки. Чтобы понять их значение, переведем данный результат в качественные с помощью шкалы оценок. Данная шкала оценивания выглядит следующим образом:

Если  $0 \leq Y_r \leq 20$ , то уровень риска является низким;

Если  $20 < Y_r \leq 30$ , то уровень риска является средним;

Если  $30 < Y_r \leq 40$ , то уровень риска является высоким;

Если  $40 < Y_r \leq 50$ , то уровень риска является очень высоким.

8. *Подведение итоговой оценки эффективности защиты персональных данных.* На восьмом этапе определяется итоговая оценка эффективности защиты персональных данных. Оценка эффективности формируется благодаря сравнительному анализу, который был получен в результате просчета модели показателя уровня риска и рассчитанной вероятности реализации угроз. Уровень эффективности мер защиты информации производится согласно табл. 3.

Таблица 3

#### Уровень эффективности мер защиты информации

Table 3

| <i>Level of effectiveness of information security measures</i> |   |         |         |
|--|---|---------|---------|
| Уровень риска ИБ ( $Y_r$ )                                     | Возможность реализации угроз ( $V_{ry}$ ) |         |         |
|  | Низкий                                    | Средний | Высокий |
| Низкий   | 0   | 1       | 2       |
| Средний  | 1   | 2       | 3       |
| Высокий  | 2   | 3       | 4       |
| Очень высокий  | 3   | 4       | 5       |

Данная шкала оценивания выглядит следующим образом:

Если 0...1, то уровень эффективности мер защиты конфиденциальной информации является достаточно высокой;

Если 2...3, то уровень эффективности мер защиты конфиденциальной информации является средней;

Если 4...5, то уровень эффективности мер защиты конфиденциальной информации является очень низкой.

### Результаты

Особенностью разработанного алгоритма является возможность оценки уровня эффективности мер защиты конфиденциальной информации не только в медицинских, но и в других организациях. Для расчета оценки эффективности мер защиты разработан алгоритм оценки показателя вероятности реализации угроз, базирующийся на экспертно-статистической оценке. Данная математическая модель позволит рассчитать оптимальный показатель уровня эффективности мер защиты конфиденциальной информации.

### Заключение

Разработанный алгоритм можно использовать для оценки эффективности защиты персональных данных в различных организациях. Исходя из этого, данное исследование приведет к повышению уровня оценки эффективности мер защиты конфиденциальной информации в медицинских организациях, что, в свою очередь, приведет к повышению эффективности работы сферы здравоохранения.



### Список источников:

1. Рытов М.Ю., Лексиков Е.В. Формализация методов анализа рисков информационной безопасности // Вестник БГТУ. – № 3. – 2018. – С. 141-146.
2. Конарева Л.А. Качество потребительских товаров как элемент национальной безопасности // США-Канада: экономика, политика, культура. – 2019. – № 11.
3. Котов В. Организация государственных (муниципальных) концессий и экономическая безопасность // Экономист. – 2020. – № 5.
4. Федеральный закон от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации».
5. Мещеряков Р.В. Защита персональных данных в организациях здравоохранения. – М.: Горячая линия – Телеком, 2020. – 137 с.
6. Адамов Н.А., Морозова А.К., Морозов А.Ю., Хмелев С.А. Конкурентные преимущества как фактор обеспечения экономической безопасности потребительской кооперации // Russian Journal of Management. – 2019. – Т. 7. – № 3. – 61 с.
7. Басалай С.В. Построение системы управления рисками для повышения экономической безопасности // Микроэкономика. – 2019. – № 2.
8. Бауэр В.П. Экономическая безопасность и международные резервы Банка России / В.П.Бауэр, Е.М.Литвинова // ЭКО. – 2018. – № 9.
9. Бендиков М., Хрусталева Е. Экономическая безопасность наукоемких производств // Вопросы экономики. – 2019. – № 9.
10. Бендиков М.А., Хрусталева Е.Ю. Наукоемкие производства и экономическая безопасность // ЭКО. – 2020. – № 8.
11. Бекетов Н.В., Тарасов М.Е. Проблемы обеспечения экономической безопасности государства в сфере внешнеэкономической деятельности // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2019. – № 8.
12. Рытов М.Ю., Седаков К.А. Анализ возможности применения методики определения актуальных угроз безопасности информации для медицинских учреждений // Информационные системы и технологии. – 2023. – № 5 (139). С. 112-119.
13. Седаков К.А., Рытов М.Ю. Анализ методик обеспечения информационной безопасности медицинских учреждений // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. сборник научных статей Всероссийской конференции. – 2023. – С. 78-80.

### References:

1. Rytov M.Yu., Leksikov E.V. Formalization of Methods for Analysis of Information Security Risks. Bulletin of BSTU. 2018;3:141-146.
2. Konareva L.A. The Quality of Consumer Goods as an Element of National Security. USA-Canada: Economics, Politics, Culture. 2019;11.
3. Kotov V. Organization of State (Municipal) Concessions and Economic Security. The Economist. 2020;5.
4. Federal Law From 2006 Jul 27 on Information, Information Technologies and the Protection of Information, no. 149-FZ (27-07-2006).
5. Meshcheryakov R.V. Protection of Personal Data in Healthcare Organizations. Moscow: Hotline-Telecom; 2020.
6. Adamov N.A., Morozova A.K., Morozov A.Yu., Khmelev S.A. Competitive Advantages as a Factor of Ensuring Economic Security of Consumer Cooperation. Russian Journal of Management. 2019;7(3):61.
7. Basalai S.V. Construction of a Risk Management System to Increase Economic Security. Microeconomics. 2019;2.
8. Bauer V.P., Litvinova E.M. Economic Security and International Reserves of the Bank of Russia. EKO. 2018;9.
9. Bendikov M., Khrustalev E. Economic Security of Science-Intensive Production. Voprosy Ekonomiki. 2019;9.
10. Bendikov M.A., Khrustalev E.Yu. Science-Intensive Production and Economic Security. ECO. 2020;8.
11. Beketov N.V., Tarasov M.E. Problems of Ensuring the Economic Security of the State in the Sphere of Foreign Economic Activity. National Interests: Priorities and Security. 2019;8.
12. Rytov M.Yu., Sedakov K.A. Analysis of the Possibility of Using the Methodology for Determining Current Threats to Information Security for Medical Institutions. Information Systems and Technologies. 2023;5(139):112-119.
13. Sedakov KA, Rytov MYu. Analysis of the Methods for Ensuring Information Security of Medical Institutions. In: Proceedings of the All-Russian Conference on Automation and Modelling in Design and Management: 2023. p. 78-80.

### **Информация об авторах:**

#### **Рытов Михаил Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Системы информационной безопасности» Брянского государственного технического университета

#### **Седаков Кирилл Андреевич**

ассистент кафедры «Системы информационной безопасности» Брянского государственного технического университета

### **Information about the authors:**

#### **Rytov Mikhail Yurievich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department «Information Security Systems» of Bryansk State Technical University

#### **Sedakov Kirill Andreevich**

Assistant of the Department «Information Security Systems» of Bryansk State Technical University

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 04.02.2024; одобрена после рецензирования 19.02.2024; принята к публикации 28.02.2024.**

**The article was submitted 04.02.2024; approved after reviewing 19.02.2024; accepted for publication 28.02.2024.**

**Рецензент** – Еременко В.Т., доктор технических наук, профессор, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева.

**Reviewer** – Eremenko V.T., Doctor of Technical Sciences, Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev.

## Электротехнические комплексы и системы

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.314.58

doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-81-88

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ СВИНЦОВО-КИСЛОТНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ

Максим Сергеевич Сиротский<sup>1✉</sup>, Александр Анатольевич Пугачев<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Брянский государственный технический университет, Брянск, Брянская область, Россия

<sup>1</sup> sirotskiys@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-0269-3031>

<sup>2</sup> alexander-pugachev@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

**Аннотация.** Проведен анализ рынка источников бесперебойного питания, который показал актуальность исследований работы свинцово-кислотных аккумуляторных батарей, в том числе в направлении повышения срока их эксплуатации. Целью статьи является разработка математической модели для оценки срока службы свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. Математическая модель разработана на основе экспериментальных значений, указанных в технической документации основных производителей свинцово-кислотных аккумуляторов, для обработки которых применены численные методы. Приведена эквивалентная тепловая схема замещения аккумуляторной батареи. В результате получены аналитические зависимости максимального количества циклов и скорости старения различных герметизированных аккумуляторных батарей от глубины разряда и их температуры как основных факторов, влияющих на процесс старения. Адекватность полученных результатов обеспечивается удовлетворительной сходимостью со справочными данными. На основании полученных результатов даны рекомендации по обеспечению требуемых параметров надежности с учетом основных алгоритмов работы источников бесперебойного питания и спектра внешних воздействий и конструктивных особенностей аккумуляторных батарей.

**Ключевые слова:** аккумуляторная батарея, источник бесперебойного питания, срок службы, скорость старения, интерполяция, количество циклов, глубина разряда, температура

**Для цитирования:** Сиротский М.С., Пугачев А.А. Математическое моделирование срока службы свинцово-кислотных аккумуляторных батарей для источников бесперебойного питания // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №1 (23). С. 81-88. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-81-88.

Original article

Open Access Article

### MATHEMATICAL MODELING OF LIFETIME OF LEAD ACID BATTERIES FOR UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLIES

Maksim S. Sirotskiy<sup>1✉</sup>, Alexander A. Pugachev<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation

<sup>1</sup> sirotskiys@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-0269-3031>

<sup>2</sup> alexander-pugachev@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

**Abstract.** An analysis of the uninterruptible power supply market was carried out, which showed the relevance of research on the operation of lead-acid batteries, including in the direction of increasing the term of their exploitation. The purpose of the article is to develop a mathematical model for assessing the lifetime of lead-acid batteries. The mathematical model is developed on the basis of experimental readings specified in the technical documentation of the main manufacturers of lead-acid batteries, for the processing of which numerical methods are used. An equivalent thermal circuit for battery replacement is shown. As a result, analytical dependencies of the maximum number of cycles and the

aging rate of various sealed batteries on the discharge depth and their temperature as the main factors affecting the aging process are obtained. The adequacy of the results obtained is ensured by satisfactory convergence with the reference data. Based on the obtained results, recommendations are given to ensure the required reliability parameters, taking into account the main algorithms of operation of uninterruptible power supply sources and the spectrum of external effects and design features of storage batteries.

**Keywords:** battery, uninterruptible power supply, lifetime, aging rate, interpolation, number of cycles, discharge depth, temperature

**For citation:** Sirotskiy M.S., Pugachev A.A. Mathematical Modeling of Lifetime of Lead Acid Batteries for Uninterruptible Power Supplies. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 1 (23). pp. 81-88. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-81-88.

## Введение

Анализ рынка аккумуляторных батарей источников бесперебойного питания показывает постоянный рост, их количество в России в настоящее время составляет несколько миллионов. Расширение диапазона применения аккумуляторных батарей происходит не только в промышленности, но и на транспорте и энергетике [1, 2]. Наибольшая доля аккумуляторов произведена и поставлена зарубежными компаниями (DELTA Battery, Ippon, CSB Energy Technology, Leoch Battery Technology, Ventura и др.).

Большая часть аккумуляторов для источников бесперебойного питания имеет срок эксплуатации 5...12 лет. При этом опыт использования таких аккумуляторов показывает, что средний ресурс их эксплуатации составляет 3...5 лет, а зачастую и меньше.

Основную долю рынка аккумуляторных батарей для источников бесперебойного питания в настоящее время занимают свинцово-кислотные аккумуляторы.

По типу электролита свинцово-кислотные аккумуляторы делятся на три вида:

- 1) негерметичные с жидким электролитом в виде разбавленной серной кислоты;
- 2) герметизированные батареи Gel с электролитом, загущенным при помощи силикагеля (SiO<sub>2</sub>);
- 3) герметизированные батареи AGM (Absorbent Glass Mat или «абсорбирующее стекловолокно») с электролитом в виде пропитанного волокна.

Результаты сравнения аккумуляторных батарей GEL и AGM показаны на рис. 1.



**Рис. 1. Сравнение свинцово-кислотных аккумуляторов GEL и AGM**  
**Fig. 1. Comparison of lead-acid GEL and AGM batteries**

Анализ результатов сравнения показывает, что аккумуляторы с AGM используются в источниках бесперебойного питания в основном для буферного режима с неглубокими разрядами, поскольку обладают преимуществом в стоимости и не требуют повышенного количества зарядно-разрядных циклов.

Проблеме компьютерного и математического моделирования аккумуляторных батарей

посвящен ряд работ [3, 4]; имеются исследования, учитывающие изменение срока службы из-за деградации параметров [5, 6]. В [7] описано применительно к свинцово-кислотным батареям несколько методов в оценке срока службы. Первый метод использует физико-химическую модель старения, основанную на изучении химических и электрохимических реакций. Второй метод основан на предположении, что деградация батареи влияет на ее первоначальную номинальную емкость. Третий метод основан на использовании кривой Велера, которая моделирует скорость старения в зависимости от количества циклов. Для электрохимических систем такой подход справедлив при выполнении нескольких условий. В [8] приведены эмпирические зависимости количества циклов от ряда эксплуатационных факторов. В [9] приведен анализ физических процессов старения в зависимости от температуры аккумулятора и ее колебаний, в [10] проанализированы методы исследования влияния температуры на срок службы аккумулятора. В [11] исследованы зависимости параметров эквивалентной схемы замещения аккумуляторной батареи от тока заряда-разряда, количества заряда и температуры. Особенностям процесса нагрева и охлаждения аккумуляторных батарей и проблеме управления ими посвящены работы [12, 13, 14].

Целью настоящей статьи является разработка нового подхода к моделированию оценки срока службы свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. Предлагаемая методика основана на математических моделях старения в зависимости от глубины разряда  $\theta_p$  и температуры  $T$ . Новая модель разработана с использованием экспериментальных значений, указанных в технической документации основных производителей свинцово-кислотных аккумуляторов, численных методов обработки экспериментальных данных. Адекватность математической модели подтверждается удовлетворительным совпадением полученных результатов со справочными данными.

### Модель определения срока службы относительно глубины разряда

На основе данных от основных производителей аккумуляторных батарей, предназначенных для источников бесперебойного питания, составлена табл. 1, характеризующая срок службы, взаимосвязанный с количеством циклов и глубиной разряда.

Зависимость количества циклов от глубины разряда

Таблица 1

Table 1

#### *Dependence of number of cycles on discharge depth*

| № п. | Производитель            | Модель (тип электролита AGM)   | Тип электролита | Срок службы в буферном режиме, лет | Количество циклов при различной глубине разряда |      |       |
|------|--------------------------|--|-----------------|------------------------------------|---|------|-------|
|      |                          |  |                 |                                    | 30 %  | 50 % | 100 % |
| 1    | DELTA Battery            | HR6-4.5...HR12-26  | AGM             | 8                                  | 1200  | 450  | 250   |
| 2    | DELTA Battery            | HR12-40...HR12-100   | AGM             | 10...12                            | 1300  | 550  | 300   |
| 3    | DELTA Battery            | HR12-21W...HR12-80W  | AGM             | 8                                  | 1200  | 550  | 300   |
| 4    | DELTA Battery            | HRL12-7.2X...HRL 12-180X, HRL12-155W...HRL 12-890W                               | AGM             | 12                                 | 1300  | 600  | 300   |
| 5    | CSB Energy Technology    | GP645...GP121000, HR12120W, UPS123606, GPL12120...GPL12260, GPL12400...GPL121000 | AGM             | 5...10                             | 1200  | 450  | 260   |
| 6    | IPPON                    | IP12-5...IP12-17, IP12-100...IP12-200, IPL12-7...IPL12-65                        | AGM             | 5...10                             | 1200  | 450  | 250   |
| 7    | Leoch Battery Technology | DJW12-4,5...DJW12-33, DJM12-38...DJM12-250                                       | AGM             | 8...12                             | 1200  | 450  | 250   |
| 8    | Ventura                  | GP, GPL, HR, HRL   | AGM             | 6...12                             | 1200  | 450  | 250   |

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что максимальное количество циклов во всем диапазоне изменения глубины разряда имеет модель в п. 4; минимальное количество циклов имеют модели в пп. 1, 6 – 8. На основе полученных данных для определения области зависимостей максимального количества циклов от глубины разряда и дальнейшего построения математической модели, проведем степенную интерполяцию для минимальных и максимальных значений:

$$N_{1678} = 205,05\theta_p^{-1,446}; \quad (1)$$

$$N_4 = 268,27\theta_p^{-1,338}, \quad (2)$$

где  $N_{1678}$  – количество циклов заряда-разряда в части пп. 1, 6 – 8 табл. 1;  $N_4$  – количество циклов заряда-разряда в части п. 4 табл. 1;  $\theta_p$  – глубина разряда (в долях).

Таким образом, получены две зависимости (рис. 2, а), характеризующие диапазон срока службы различных типов герметичных свинцово-кислотных аккумуляторов, массово применяемых для источников бесперебойного питания.

Для сравнения полученных результатов используем справочную зависимость числа зарядно-разрядных циклов от глубины разряда [8]:

$$\lg N_c = \lg N_1 - b(1 - \theta_p) \quad (3)$$

где  $N_c$  – число циклов заряда-разряда;  $N_1$  – число циклов при  $\theta_p = 0$ ;  $b$  – эмпирический коэффициент равный -0,9...-0,97.

На основе приведенной формулы построены справочные зависимости и показаны на рис. 2, б.

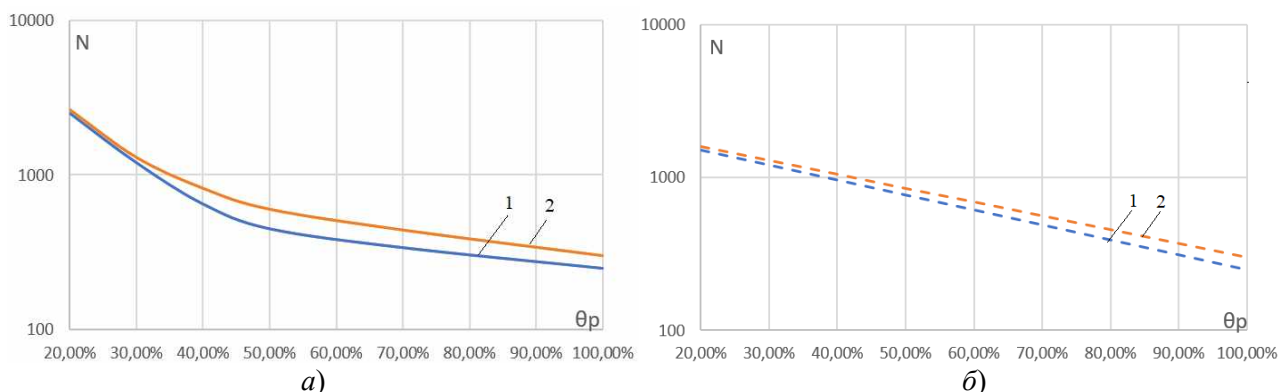


Рис. 2. Зависимости максимального количества циклов  $N_{C1678}$  (1),  $N_{C4}$  (2) от глубины разряда  $\theta_p$   
 Fig. 2. Dependencies of the maximum number of  $N_{C1678}$  (1),  $N_{C4}$  (2) cycles on the  $\theta_p$  discharge depth

### Модель влияния температуры на срок службы аккумуляторов

Одной из серьезных проблем, влияющих на ресурс герметизированных свинцово-кислотных аккумуляторов является отвод тепла, возникающего в результате реакции восстановления кислорода и реакции рекомбинации газов. Основными производителями герметичных аккумуляторов оценивается влияние температуры на количество циклов заряда-разряда относительно контрольной температуры 20 °С. При этом следует учитывать, что согласно закону Аррениуса свинцово-кислотные аккумуляторы, при повышении температуры свыше 20 °С, на каждые 10 °С снижают срок службы на 50 % [9]. Также указанная зависимость подтверждается экспериментальными данными от производителей аккумуляторных батарей. Для определения количества циклов  $N_T$  в зависимости от рабочей температуры  $T$  при интерполяции математической модели учтем значения представленные в табл. 2.

Процент числа циклов аккумуляторной батареи по сравнению с эталоном, измеренным при 20 °С, определяется уравнением:

$$N_{T\%} = \frac{N_{\theta T}}{N_{\theta 20^{\circ}C}} \quad (4)$$

где  $N_{T\%}$  – число циклов аккумуляторной батареи в процентах;  $N_{\theta T}$  – число циклов при температуре  $T$ ;  $N_{\theta 20^{\circ}C}$  – число циклов аккумуляторной батареи при температуре 20 °С.

## Зависимость количества циклов от температуры

Table 2

## Number of cycles versus temperature

| $T, ^\circ\text{C}$ | 20  | 25 | 30 | 40 | 50   |
|---------------------|-----|----|----|----|------|
| $N_T, \%$           | 100 | 71 | 50 | 25 | 12,5 |

С использованием экспоненциальной интерполяции на основе данных, полученных в табл. 2, синтезирована математическая модель, отражающая изменение количества циклов  $N_{T\%}$  в зависимости от температуры  $T$ :

$$N_{T\%} = \begin{cases} 100 & 0 < T \leq 20^\circ\text{C} \\ 401,07e^{-0,069T} & T > 20^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

Чтобы определить рабочую температуру аккумулятора используем следующее соотношение:

$$T = T_{\text{окр}} + \Delta T, \quad (6)$$

где  $T_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды;  $\Delta T$  – разница температур, связанная с внутренними тепловыми потерями  $P_T$ .

Связь между разницей температур  $\Delta T$  и тепловыми потерями  $P_T$  определим, используя тепловую модель свинцово-кислотной аккумуляторной батареи, которая оценит потери тепла, вызванные внутренними и внешними воздействиями. Внешний нагрев связан с температурой окружающей среды, в то время как внутренние потери тепла зависят от омического сопротивления  $R_U$  токопроводящих частей электродов, их активных масс и сопротивления электролита, а также поляризационного сопротивления  $R_{\text{пол}}$ , отражающего динамику электрохимических реакций аккумуляторной батареи [10].

Эквивалентная электрическая схема, приведенная на рис. 3, отражает тепловую модель, которая содержит тепловую емкость двойного слоя  $C_{\text{дв}}$ , тепловое сопротивление переноса заряда  $R_0$  и источник тока с омическим сопротивлением  $R_\Omega$ .

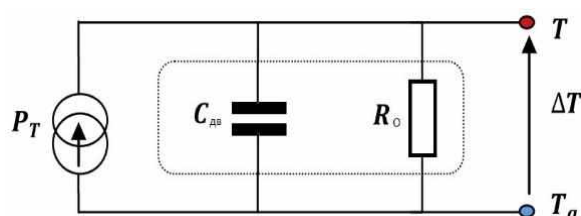


Рис. 3. Тепловая модель аккумуляторной батареи  
Fig. 3. Thermal model of the battery

Тепловые потери рассчитываются, исходя из тока  $I$  в аккумуляторной батарее и внутреннего сопротивления  $R_{\text{вн}}$ :

$$P_T = R_{\text{вн}} I^2. \quad (7)$$

Зависимость внутреннего сопротивления от тока заряда-разряда, количества заряда и температуры имеет следующий вид [11]:

$$R_{\text{вн}}(T) = (R_1 + R_2 + R_3)(1 - \alpha_T \Delta T) = \left( \frac{k_1}{1 + I^{k_2}} + \frac{k_3}{(1 - Q/C_T)^{k_4}} + k_5 \right) (1 - \alpha_T \Delta T), \quad (8)$$

где  $C_T$  – максимальная емкость АБ;  $Q$  – количество заряда, передаваемого в единицу времени;  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, \alpha_T$  – эмпирические постоянные;  $R_1, R_2$  – сопротивления активных масс и сопротивления электролита, определяющие влияние зарядно-разрядного тока  $I$  и количества заряда  $Q$  на химическое состояние аккумулятора;  $R_3 = k_5 = R_\Omega$  – омическое сопротивление.

Разница температур  $\Delta T$  определяется тепловой моделью АБ (см. рис. 3):

$$\Delta T = Z_T P_T = Z_T R_{\text{вн}} I^2, \quad (9)$$

где  $Z_T$  – тепловой импеданс электрохимической системы [12], состоящий из тепловой емкости двойного слоя  $C_{\text{дв}}$  параллельно с тепловым сопротивлением переноса заряда  $R_0$ .

Полученную тепловую модель интегрируем в модель старения аккумуляторной батареи и используем для оценки теплопередачи за счет проводимости и конвекции. Из-за сложности динамических процессов импеданс считаем постоянным во время циклов заряда-разряда [13, 14].

### Обобщенная модель старения свинцово-кислотной аккумуляторной батареи

Объединив уравнения (1), (5) и (6), получим выражение зависимости максимального количества циклов  $N_{\theta T}$  от глубины разряда  $\theta_p$  и температуры  $T$ :

$$N_{\theta T} = \begin{cases} (205,05\theta_p^{-1,446}), & 0 < T \leq 20^\circ\text{C} \\ (205,05\theta_p^{-1,446})(401,07e^{-0,069T}), & T > 20^\circ\text{C} \end{cases} \quad (10)$$

Как уже определили ранее – влияние температуры на процесс старения свинцово-кислотной аккумуляторной батареи в диапазоне  $0 - 20^\circ\text{C}$  незначительно. Модель старения в данном случае соответствует зависимости (1). При  $T > 20^\circ\text{C}$  влиянием внутренней температуры можно пренебречь и максимальное количество циклов  $N_{\theta T}$  получается путем перемножения правых частей уравнений (1) и (5).

Для определения скорости старения  $R_{\text{ст}\theta_k T_k}$  для каждого цикла  $k$  примем обратное значение максимального количества циклов (10):

$$R_{\text{ст}\theta_k T_k} = \frac{1}{N_{\theta_k T_k}} \quad (11)$$

Таким образом, получена скорость старения, зависящая от глубины разряда и температуры (рис. 4).

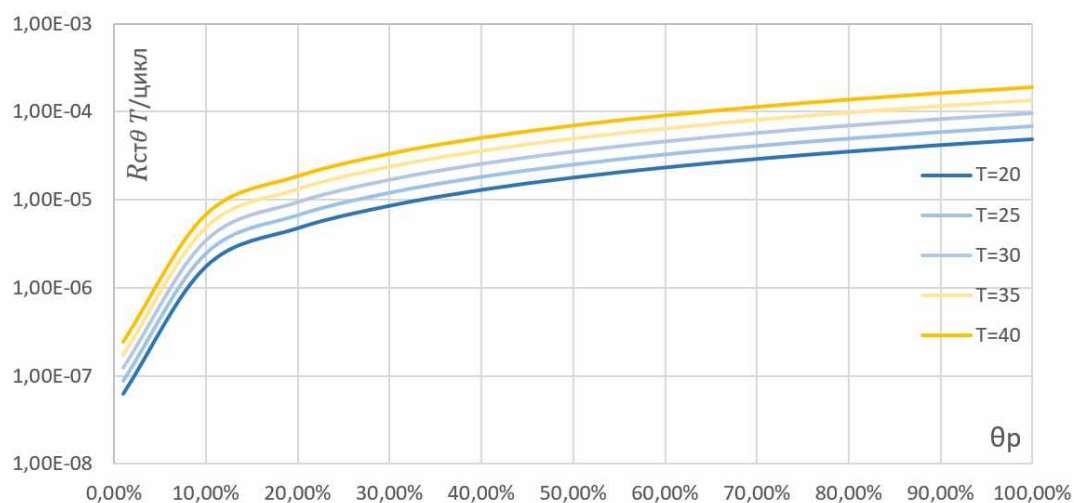


Рис. 4. Зависимость скорости старения  $R_{\text{ст}\theta_k T_k}$  за цикл от глубины разряда  $\theta_p$  и температуры  $T$   
 Fig. 4. Dependence of aging rate  $R_{\text{ст}\theta_k T_k}$  per cycle on  $\theta_p$  discharge depth and temperature  $T$

В период эксплуатации свинцово-кислотные аккумуляторные батареи с источниками бесперебойного питания работают с различными амплитудами разряда при различных температурах. Для определения скорости старения  $R_{\text{ст}}$  предлагается суммировать скорость старения каждого цикла  $R_{\text{ст}\theta_k T_k}$  для  $N$  циклов:

$$R_{\text{ст}} = \sum_{k=1}^N R_{\text{ст}\theta_k T_k} \quad (12)$$

В случае приближения накопленной скорости старения к максимальному значению происходит завершение срока службы свинцово-кислотной аккумуляторной батареи.

Для практического использования разработанной методики необходимо предусмотреть систему мониторинга состояния аккумуляторной батареи, позволяющую определять количество циклов заряда-разряда, глубину разряда и ее температуру.



## Заключение

В результате проведенного анализа установлено, что основную долю рынка аккумуляторных батарей для источников бесперебойного питания занимают свинцово-кислотной химические источники тока. При построении математических моделей с целью определения скорости старения и количества циклов аккумуляторных батарей необходимо использовать экспериментальные данные и/или данные, указанные в руководствах по эксплуатации от производителей. Для интерполяции дискретных данных применена степенная функция. Полученная обобщенная математическая модель скорости старения от глубины разряда и температуры позволяет на основе текущих данных систем мониторинга или телеметрии прогнозировать оставшееся количество циклов заряда-разряда до завершения срока службы различных герметизированных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей.

### Список источников:

1. Космодамианский А.С., Баташов С.И., Николаев Е.В. Разработка устройств предотвращения боксования локомотива на основе объектного моделирования технических решений // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. №. 4. С. 79-86. DOI: <https://doi.org/10.30987/2658-6436-2022-4-79-86>
2. Морозов С.В., Андриянов А.И. Моделирование режима одностороннего включения линии электропередачи сверхвысокого напряжения с применением устройства синхронизации моментов включения контактов фаз выключателя // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2023. №. 2. С. 89-96. DOI: <https://doi.org/10.30987/2658-6436-2023-2-89-96>
3. Чернов М.Б., Голубков А.В. Компьютерное моделирование динамики состояния заряда (SOC) электрических аккумуляторов // Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. 2023. № 1. С. 171-179.
4. Карамов Д.Н., Муфтахов И.Р., Потапов В.В., Сыромятников А.А., Шушпанов И.Н. Универсальная модель срока службы аккумуляторных батарей в автономных фотоэлектрических системах // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 2(26). – С. 85-96. – DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.008.
5. Доброго К.В., Бладыко Ю.В. Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 1. С. 27-39. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39/>
6. Фоменко Н.С., Григорьев А.С., Данисилов А.С. Особенности моделирования свинцово-кислотного аккумулятора // Электрохимическая энергетика. 2019. Т. 19 (2). С. 81-89. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-2-81-89>.
7. Sauer D.U., Wenzl H. Comparison of different approaches for lifetime prediction of electrochemical systems-using lead-acid batteries as example. J. Power Sources 176 (2008). Pp. 534-546.
8. Коровина Н.В., Скундина А.М. Химические источники тока: Справочник // М.: Издательство МЭИ, 2003. С. 267.
9. Classic-Handbook for Stationary Vented Lead-Acid Batteries Part 2, Installation, Commissioning and Operation, Industrial Power, Application Engineering, GNB a division of Exide Technologies, Edition 4, January 2012.

### References:

1. Kosmodamianskiy A.S., Batashov S.I., Nikolaev E.V. Development of locomotive skid prevention devices based on object modeling of technical solutions // Automation and modeling in design and management. 2022;4:79-86. DOI: <https://doi.org/10.30987/2658-6436-2022-4-79-86>
2. Morozov S.V., Andriyanov A.I. Simulating the mode of one-sided switching-on of an ultra-high voltage power line using a device for synchronizing the moments of switching-on the contacts of the circuit breaker phases // Automation and modeling in design and management. 2023;2:89-96. DOI: <https://doi.org/10.30987/2658-6436-2023-2-89-96>
3. Chernov M.B., Golubkov A.V. Computer simulation of the State of Charge (SOC) dynamics of electric batteries // Scientific letters of UISU. Math and information technologies. 2023;1:171-179.
4. Karamov D.N., Muftahov I.R., Potapov V.V., Syromyatnikov A.A., Shushpanov I.N. Methodology for calculating the lifetime of storage batteries in autonomous photovoltaic systems // Information and mathematical technologies in science and management. 2022;2(26):85-96. DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.008.
5. Dobrego K.V., Bladyko Y.V. Modeling of Batteries and their Assemblies Taking into Account the Degradation of Parameters. Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. 2021. 64 (1):27-39. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39/>
6. Fomenko N.S., Grigoryev A.S., Dinisilov A.S. Specific Features of Lead-Acid Battery Modelling. Electrochemical Energetics, 2019;19(2):81-89. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-2-81-89>.
7. Sauer D.U., Wenzl H. Comparison of different approaches for lifetime prediction of electrochemical systems-using lead-acid batteries as example. J. Power Sources. 2008;176(2):534-546.
8. Korovina N.V., Skundina A.M. Chemical current sources: Reference book // М.: MPEI Publishing House, 2003.
9. Classic-Handbook for Stationary Vented Lead-Acid Batteries Part 2, Installation, Commissioning and Operation, Industrial Power, Application Engineering, GNB a division of Exide Technologies, Edition 4, January 2012.

10. Таганова А.А., Бубнов Ю.И., Орлов С. Б. Герметичные химические источники тока: Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации: Справочник // СПб.: ХИМИЗДАТ, 2005. С.217.

11. Copetti J.B., Chenlo F. Lead/acid batteries for photovoltaic applications: test results and modeling. J. Power Sources 47 (1994). Pp. 109-118.

12. Стоинов З.Б., Графов Б.М., Савова-Стойнова Б. и др. Электрохимический импеданс. М.: Наука. 1991. С. 336.

13. Layadi T.M., Mostefai M., Champenois G., Abbes D. Dimensioning a hybrid electrification system 11. (PV/WT/DG/battery) using a dynamic simulator. International Conference on Electrical Engineering and Software Applications conference (ICEESA), 21-23 March 2013, Tunisia.

14. Layadi T.M., Champenois G., Mostefai M., Abbes D. Etude du vieillissement d'un banc de stockage plomb-acide dans un système hybride multi-sources, in: Symposium de Génie électrique (SGE'14), 8-10 juillet March 2014, France.

10. Taganova A.A., Bubnov Yu.I., Orlov S. B. Hermetic chemical current sources: Elements and accumulators. Equipment for testing and operation: Handbook //St. Petersburg: HIMIZDAT, 2005.

11. Copetti J.B., Chenlo F. Lead/acid batteries for photovoltaic applications: test results and modeling. J. Power Sources. 1994; 47:109-118.

12. Stoinov Z.B., Grafov B., Savova-Stoinova B., etc. Electrochemical impedance. M.: Science. 1991.

13. Layadi T.M., Mostefai M., Champenois G., Abbes D. Dimensioning a hybrid electrification system 11. (PV/WT/DG/battery) using a dynamic simulator. International Conference on Electrical Engineering and Software Applications conference (ICEESA), 21-23 March 2013, Tunisia.

14. Layadi T.M., Champenois G., Mostefai M., Abbes D. Study of the aging of a lead-acid storage bench in a hybrid multi-source system, in: Symposium of Electrical Engineering (SGE'14), 8-10 July March 2014, France.

#### **Информация об авторах:**

##### **Сиротский Максим Сергеевич**

аспирант кафедры «Турбиностроение, электро- и теплоэнергетика» Брянского государственного технического университета

##### **Пугачев Александр Анатольевич**

доктор технических наук, заведующий кафедрой «Турбиностроение, электро- и теплоэнергетика» Брянского государственного технического университета

#### **Information about the authors:**

##### **Sirotskiy Maksim Sergeevich**

Postgraduate Student of the Department «Turbine Engineering, Electric and Thermal Power Engineering» of Bryansk State Technical University

##### **Pugachev Alexander Anatolievich**

Doctor of Technical Sciences, Head of the Department «Turbine Engineering, Electric and Thermal Power Engineering» of Bryansk State Technical University

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 10.02.2024; одобрена после рецензирования 28.02.2024; принята к публикации 03.03.2024.**

**The article was submitted 10.02.2024; approved after reviewing 28.02.2024; accepted for publication 03.03.2024.**

**Рецензент – Космодамианский А.С., доктор технических наук, профессор, Российский университет транспорта.**

**Reviewer – Kosmodamianskiy A.S., Doctor of Technical Sciences, Professor, Russian University of Transport.**

---

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: (4832) 56-49-90. E-mail: aim-ru@mail.ru

*Вёрстка А.Г. Малаханова. Редактор Д.А. Петраченко.*

Сдано в набор 15.03.2024. Выход в свет 29.03.2024.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10,23.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет»

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

---

12+