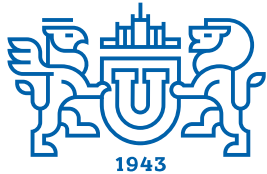


ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2024
Т.24, № 1

ISSN 1991-976X (Print)
ISSN 2409-6571 (Online)

СЕРИЯ

«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Журнал освещает новые научные достижения и практические разработки ученых по актуальным проблемам компьютерных технологий, управления и радиоэлектроники.

Основной целью издания является пропаганда научных исследований в следующих областях:

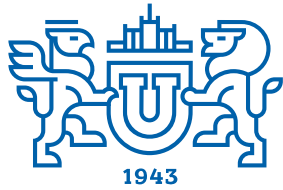
- Автоматизированные системы управления в энергосбережении
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами
- Антенная техника
- Инфокоммуникационные технологии
- Информационно-измерительная техника
- Навигационные приборы и системы
- Радиотехнические комплексы
- Системы автоматизированного управления предприятиями в промышленности
- Системы управления летательными аппаратами

Редакционная коллегия:

Логиновский О.В., д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (гл. редактор) (г. Челябинск);
Бурков В.Н., д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (зам. гл. редактора) (г. Москва);
Голлай А.В., д.т.н., доц. (зам. гл. редактора) (г. Челябинск);
Захаров В.В., отв. секретарь (г. Челябинск);
Баркалов С.А., д.т.н., проф. (г. Воронеж);
Березанский Л., PhD, проф. (г. Беэр-Шева, Израиль);
Джапаров Б.А., д.т.н., проф. (г. Астана, Казахстан);
Затонский А.В., д.т.н., проф. (г. Пермь);
Куликов Г.Г., д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (г. Уфа);
Мазуров В.Д., д.ф.-м.н., проф. (г. Екатеринбург);
Максимов А.А., д.т.н. (г. Новокузнецк);
Мельников А.В., д.т.н., проф. (г. Ханты-Мансийск);
Прангишвили А.И., д.т.н., проф. (г. Тбилиси, Грузия);
Щепкин А.В., д.т.н., проф. (г. Москва);
Ячиков И.М., д.т.н., проф. (г. Магнитогорск)

Редакционный совет:

Шестаков А.Л., д.т.н., проф. (председатель) (г. Челябинск);
Авербах И., PhD, проф. (г. Торонто, Канада);
Браверман Е., PhD, проф. (г. Калгари, Канада);
Дегтярь В.Г., д.т.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Миасс, Челябинская обл.);
Казаринов Л.С., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Кибалов Е.Б., д.э.н., проф. (г. Новосибирск);
Новиков Д.А., д.т.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Москва);
Панферов В.И., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Слинько А., PhD, проф. (г. Окленд, Новая Зеландия);
Столбов В.Ю., д.т.н., проф. (г. Пермь);
Танана В.П., д.ф.-м.н., проф. (г. Челябинск);
Ухоботов В.И., д.ф.-м.н., проф. (г. Челябинск);
Ушаков В.Н., д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Екатеринбург);
Шестаков И., д.ф.-м.н., проф. (г. Сан-Паулу, Бразилия);
Ширяев В.И., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Шнайдер Д.А., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Штессель Ю., PhD, проф. (г. Хантсвилл, Алабама, США)



BULLETIN

OF THE SOUTH URAL
STATE UNIVERSITY

2024

Vol. 24, no. 1

SERIES

“COMPUTER TECHNOLOGIES,
AUTOMATIC CONTROL,
RADIO ELECTRONICS”

ISSN 1991-976X (Print)
ISSN 2409-6571 (Online)

Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta.
Seriya “Komp'yuternye Tekhnologii, Upravlenie, Radioelektronika”

South Ural State University

The journal covers new scientific achievements and practical developments of scientists on actual problems of computer technologies, control and radio electronics.

The main purpose of the series is information of scientific researches in the following areas:

- Automated control systems in energy saving
- Automated process control
- Antenna technique
- Communication technologies
- Information and measuring equipment
- Navigation devices and systems
- Radio engineering complexes
- Computer-aided management of enterprises in industry
- Control systems of aircrafts

Editorial Board:

Loginosvkiy O.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Burkov V.N., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*deputy editor-in-chief*), Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

Gollai A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Ass. Prof. (*deputy editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Zakharov V.V., *executive secretary*, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Barkalov S.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Voronezh State Technical University Voronezh, Russian Federation;

Berezansky L., PhD, Prof., Ben Gurion University of the Negev, Israel;

Dzhaparov B.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Archive of the President of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan;

Zatonskiy A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science and Education of the Russian Federation, Berezniki Branch of the Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia;

Kulikov G.G., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation;

Mazurov V.D., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation;

Maksimov A.A., Dr. of Sci. (Eng.), Open Joint Stock Company ‘Kuznetsk Ferroalloys’, Novokuznetsk, Russian Federation;

Melnikov A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russian Federation;

Prangishvili A.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of National Academy of Sciences of Georgia, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia;

Shechepkin A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

Yachikov I.M., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Magnitogorsk State Technical University of G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation.

Editorial Council:

Shestakov A.L., Dr. of Sci. (Eng.), Prof. (*chairman*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Averbakh I., PhD, Prof., University of Toronto, Canada;

Braverman E., PhD, Prof., St. Mary's University, Calgary, and Athabasca University, Department of Science, Athabasca, Canada;

Degtyar' V.G., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Academician V.P. Makeyev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation;

Kazarinov L.S., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Kibalov E.B., Dr. of Sci. (Econ.), Prof., Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation;

Novikov D.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

Panferov V.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russian Federation;

Slinko A., PhD, Prof., University of Auckland, New Zealand;

Stolbov V.Yu., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation;

Tanana V.P., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Ukhobotov V.I., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Ushakov V.N., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, N.N. Krasovskiy Institute of Mathematics and Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation;

Shestakov I., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., São Paulo University, Brazil;

Shiryayev V.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Schneider D.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Shtessel Yu., PhD, Prof., Huntsville, Alabama, USA.

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика и вычислительная техника

КАПУЛИН Д.В., ВОРОНКОВ М.С., РУССКИХ П.А., ДРОЗД О.В. Автоматизированная система оперативной регистрации технических изменений предприятия радиоэлектронной промышленности	5
ЛОГИНОВСКИЙ О.В., ВОЛОВИЧ Г.И., ТОПОЛЬСКИЙ Д.В., ТОПОЛЬСКИЙ Н.Д., БЕЛЯКОВ А.Е. Разработка программного комплекса для испытания цифровых измерительных трансформаторов на вибростенде	19
АРТЮШИНА Л.А., ПОЛЯНСКИЙ Д.А. Подходы к оценке защищённости информационных систем с криптографическим преобразованием объектов	32

Управление в технических системах

АХМЕДЬЯНОВА Г.Ф., ПИЩУХИН А.М. Исследование предиктивных схем управления функционированием организационно-технических систем	44
БАРКАЛОВ С.А., СЕРЕБРЯКОВА Е.А., НИЖЕГОРОДОВ К.А. Алгоритмы формирования последовательности псевдослучайных чисел в натурном эксперименте при имитации процессов функционирования сложных информационных систем	52
ТЕЛЕГИН А.И. Выделение гироскопических инерционных сил из центробежных и кориолисовых инерционных сил	63

Управление в социально-экономических системах

ВАГНЕР А.Р., ГОЛЛАЙ А.В., КОРЕННАЯ К.А., ЛОГИНОВСКИЙ О.В., МАКСИМОВ А.А. Современная палитра управленческих средств и механизмов эффективного руководителя	75
МЕЛЬНИКОВ А.В., ГАЛАГАН К.В. Метод оценки эффективности мероприятий по формированию комфортной городской среды	87
ФЕДОСЕЕВ С.А., ГОРБУНОВ Д.Л. Алгоритм оптимального управления замкнутой системой рынка труда на заданном временном интервале	96

CONTENTS

Informatics and computer engineering

KAPULIN D.V., VORONKOV M.S., RUSSKIKH P.A., DROZD O.V. Automated system of operational registration of technical changes of an enterprise of radio-electronic industry	5
LOGINOVSKIY O.V., VOLOVICH G.I., TOPOLSKII D.V., TOPOLSKII N.D., BELIAKOV A.E. Development of a software package for testing digital instrument transformers on a vibration stand	19
ARTYUSHINA L.A., POLYANSKY D.A. Approaches to assessing the security of information systems with cryptographic transformation of objects	32

Control in technical systems

AKHMEDYANOVA G.F., PISHCHUKHIN A.M. Research of predictive schemes for management of the functioning of organizational and technical systems	44
BARKALOV S.A., SEREBRYAKOVA E.A., NIZHEGORODOV K.A. Algorithms of forming of the sequence of pseudorandom numbers in the natural experiment at simulation of processes of functioning of complex information systems	52
TELEGIN A.I. Separation of gyroscopic inertial forces from centrifugal and Coriolis inertial forces	63

Control in social and economic systems

WAGNER A.R., HOLLAY A.V., KORENNAYA K.A., LOGINOVSKIY O.V., MAKSIMOV A.A. Effective leader's modern management tools and mechanisms	75
MELNIKOV A.V., GALAGAN K.V. Method of assessing the effectiveness of measures to form a comfortable urban environment	87
FEDOSEEV S.A., GORBUNOV D.L. An algorithm for optimal control of a closed labor market system at a given time interval	96

Информатика и вычислительная техника Informatics and computer engineering

Научная статья

УДК 658.51

DOI: 10.14529/ctcr240101

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОЙ РЕГИСТРАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРЕДПРИЯТИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Д.В. Капулин, DKapulin@sfu-kras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4260-1408>

М.С. Воронков, Mvoronkov-a21@stud.sfu-kras.ru

П.А. Русских, Prusskikh@sfu-kras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2858-2893>

О.В. Дрозд, Odrozdz@sfu-kras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7374-253X>

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. Современное производство радиоэлектронной аппаратуры является характерным примером позаказного многономенклатурного типа производства. При позаказном производстве изделий каждый заказ является уникальным изделием. Повторяемость заказов в общем объеме заказов достаточно невелика по сравнению с новыми заказами, что приводит к большому росту номенклатуры изделий. Как правило, производимые изделия являются сложными, высокотехнологичными изделиями, которые могут иметь большую структуру, состоять из большого количества компонентов и имеют сложный технологический процесс изготовления. Таким образом, реализация полного цикла производства изделий и подготовки конструкторской документации требует сопровождения специализированными программными средствами. Из-за сложности готовых изделий и большого числа участников, задействованных в производственной деятельности, происходит экспоненциальный рост объемов информации. Без наличия актуальных данных и методов для быстрого принятия решений процесс разработки и производства не будет эффективным. Рассмотрены вопросы автоматизации отслеживания оперативных изменений конструкторской документации на всех этапах производства радиоэлектронной аппаратуры. Автоматизированные системы, отвечающие за управление жизненным циклом продукции, называются PLM – Product Lifecycle Management – это стратегия производства промышленных изделий, управляющая продуктом на всех этапах жизненного цикла. Существующие коммерческие решения в данной области обладают избыточным функционалом и сложны для интеграции в существующее информационное пространство предприятия. **Цель исследования:** исследование процесса регистрации технических изменений конструкторской документации. **Материалы и методы.** В статье представлен процесс реализации технических изменений в виде формальной модели и функциональной модели реализации журнала изменений с использованием нотации IDEF0. Представлена архитектура электронного журнала оперативной регистрации изменений в форме диаграмм графической нотации UML. **Результаты.** Предложены модели для разработки автоматизированной системы управления электронным журналом оперативной регистрации изменений. Рассмотрена программная реализация системы управления электронным журналом оперативной регистрации изменений на научно-производственном предприятии. **Заключение.** Предложенная в исследовании автоматизированная система позволяет в короткие сроки довести до производственных цехов предприятия сведения о предлагаемых изменениях в конструкцию опытного образца изделия, остановить производство, провести необходимые корректирующие действия и доработать изделие с минимизацией потерь на изготовление нового опытного образца.

Ключевые слова: техническое изменение, управление конструкторской документацией, система управления данными об изделии, журнал оперативной регистрации изменений

Для цитирования: Автоматизированная система оперативной регистрации технических изменений предприятия радиоэлектронной промышленности / Д.В. Капулин, М.С. Воронков, П.А. Русских, О.В. Дрозд // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 1. С. 5–18. DOI: 10.14529/ctcr240101

AUTOMATED SYSTEM OF OPERATIONAL REGISTRATION OF TECHNICAL CHANGES OF AN ENTERPRISE OF RADIO-ELECTRONIC INDUSTRY

D.V. Kapulin, *DKapulin@sfu-kras.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-4260-1408>

M.S. Voronkov, *Mvoronkov-a21@stud.sfu-kras.ru*

P.A. Russkikh, *Prusskikh@sfu-kras.ru*, <https://orcid.org/0000-0003-2858-2893>

O.V. Drozd, *Odrozdz@sfu-kras.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-7374-253X>

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The modern production of radio-electronic equipment is a typical example of a make-to-order type of production. With custom-made products, each order is a unique product. The repeatability of orders in the total volume of orders is quite small compared to new orders, which leads to a large increase in the product range. As a rule, manufactured products are complex, high-tech products that can have a large structure, consist of a large number of components, and have a complex manufacturing process. Thus, the implementation of the full cycle of production of products and the preparation of design documentation requires the support of specialized software. Given the complexity of finished products and the large number of participants involved in production activities, there is an exponential growth in the volume of information. Without the availability of up-to-date data and methods for quick decision making, the development and production process will not be effective. The issues of automating the tracking of operational changes in design documentation at all stages of the production of radio-electronic equipment are considered. Automated systems responsible for managing the life cycle of products are called PLM – Product Lifecycle Management – this is a strategy for the production of industrial products that manages the product at all stages of the life cycle. Existing commercial solutions in this area have redundant functionality and are difficult to integrate into the existing information space of the enterprise. **Aim.** Study of the process of registration of technical changes in design documentation. **Methods.** The article presents the process of implementing technical changes in the form of a formal model and a functional model for implementing the changelog using the IDEF0 notation. The architecture of the electronic log of operational registration of changes in the form of diagrams of UML graphic notation is presented. **Results.** Models for the development of an automated system for managing the electronic journal of operational registration of changes are proposed. The software implementation of the system for managing the electronic journal of operational registration of changes at a research and production enterprise is considered. **Conclusion.** The automated system proposed in the study allows in a short time to bring to the production shops of the enterprise information about the proposed changes in the design of a prototype product, stop production, take the necessary corrective actions and finalize the product with minimization of losses for the production of a new prototype.

Keywords: technical change, managing design documentation, product data management system, operational technical change log

For citation: Kapulin D.V., Voronkov M.S., Russkikh P.A., Drozd O.V. Automated system of operational registration of technical changes of an enterprise of radio-electronic industry. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(1):5–18. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240101

Введение

Позаказное многономенклатурное производство радиоэлектронной аппаратуры предполагает проектирование, изготовление и конфигурацию компонентов изделия по требованиям заказчика [1]. Предприятия данного типа характеризуются высоким уровнем сложности производимых изделий, небольшими размерами производимых партий, длительными сроками выполнения заказов и высоким уровнем конфигурации изделия под требования заказчика. Процесс проектирования опытных образцов радиоэлектронной аппаратуры, таких как специализированные средства связи, навигации и комплексы автоматизированного управления, имеет сложную структуру внутренних процессов и отличается значительными сроками выполнения [2–4]. При этом

необходимо оперативно отслеживать изменения, вносимые в конструкторскую документацию на изделие, которые увеличивают стоимость конечного изделия и сроки выпуска опытных образцов.

Управление жизненным циклом изделия в целом обеспечивается программными системами класса PLM (Product Lifecycle Management). Данные системы имеют достаточно широкий функционал, но основной их задачей является организация технического документооборота с обеспечением информационной целостности процесса создания, производства и сопровождения продукта [5–7]. PLM-системы различаются как по функциональным возможностям, так и по предоставляемым средствам интеграции в существующее информационное пространство предприятия. Ключевым компонентом PLM-систем являются системы управления данными об изделии (Product Data Management, PDM), обеспечивающие формирование и управление единой информационной базой конструкторской и технологической документации на изделие [8, 9].

Задача автоматизации управления данными об изделии наукоемкого предприятия может быть решена за счет внедрения PLM-систем [10]. При этом предполагается, что предприятие уже обладает соответствующей информационной инфраструктурой, позволяющей интегрировать комплексную PLM-систему, должны быть строго регламентированы процессы создания, внесения изменений, согласования и утверждения конструкторской документации. Также неизбежно возникает вопрос интеграции PLM-системы, существующих баз данных предприятия и используемых систем автоматизированного проектирования и подготовки производства [11].

Второй распространенный подход к решению задачи автоматизации управления данными предполагает разработку специализированного программного обеспечения для решения частных задач управления данными об изделии, не предполагающих формирование единого информационного пространства предприятия [12, 13]. Ключевыми недостатками данного подхода является формирование большого количества программных модулей и надстроек, решающих частные задачи управления производственным документооборотом, сложность синхронизации и интерпретации данных об изделии. И при всех преимуществах использования единых информационных PLM-систем в практике предприятий с существующей информационной инфраструктурой в основном используются программные модули и системы для решения отдельных задач автоматизации проектного документооборота.

В связи с общей нехваткой средств автоматизированной регистрации и контроля изменений конструкторской документации разработка и внедрение специализированной программной системы оперативной регистрации изменений конструкторской документации является актуальной для предприятий приборостроительной отрасли.

Формальная модель процесса реализации технических изменений

Обеспечение оперативного производственного планирования предполагает контроль ошибок в конструкции и производства продукции. В процессе разработки конструкторской документации могут возникать ошибки исполнителя, которые выявляются в процессе производства изготавливаемого изделия. Процесс внесения корректирующих изменений в конструкторскую документацию занимает определенное время, при этом довести сведения о вносимых изменениях до производства необходимо в кратчайшие сроки.

Рассмотрим общий процесс реализации технических изменений. В процессе производства опытных изделий непосредственные исполнители и отдел контроля качества (ОКК) предприятия сообщают об этом инженерам-технологам, прикрепленным к соответствующим производственным цехам. После анализа ошибки они доводят сведения о ней до подразделения-разработчика изделия. Исполнители принимают решение о целесообразности внесения технических изменений в конструкцию изделия, прошедшего некоторые стадии технологического процесса, а в некоторых случаях – полный цикл изготовления.

При принятии положительного решения о доработке разработчик непосредственно в производственном цехе фиксирует требуемые корректирующие действия в журнале изменений в бумажном формате. Далее он обязан согласовать данный пункт изменений с инженерами-технологами цеха и отделом контроля качества. При этом представитель технологического подразделения должен описать краткий технологический процесс внесения исправлений в изделие.

В итоге исполнитель пункта изменений обязан довести данные корректирующие изменения до производства [14].

Представим процесс реализации технических изменений в прямоугольной системе координат в пространстве (рис. 1). Оси абсцисс соответствуют изделию, подлежащему внесению изменений в конструкторскую документацию и последующей доработке, оси ординат – стадии реализации изменения, оси аппликат – персонал, принимающий участие в процессе реализации технических изменений.

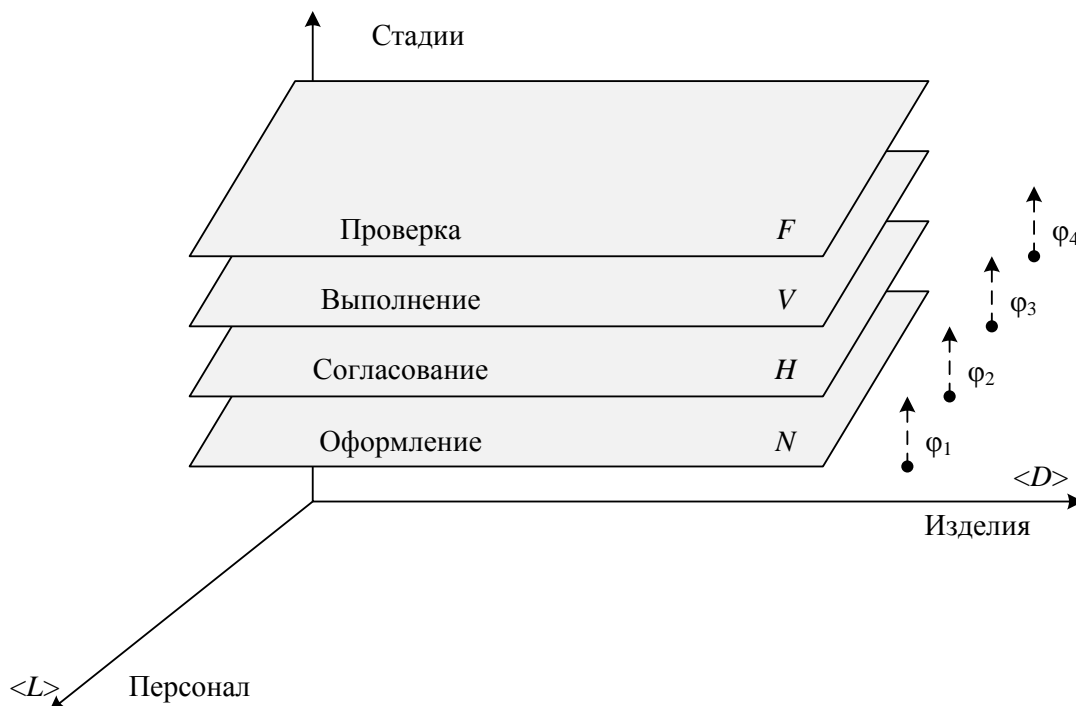


Рис. 1. Процесс реализации технических изменений в прямоугольной системе координат
Fig. 1. Implementation process of technical changes in rectangular coordinate system

Процесс реализации технического изменения подразделен на следующие стадии:

- 1) оформление соответствующего пункта журнала изменений (стадия «Оформление»);
- 2) согласование изменения с необходимыми подразделениями (стадия «Согласование»);
- 3) доработка изделия в соответствии с пунктом журнала изменений (стадия «Выполнение»);
- 4) проверка изделия после доработки необходимыми подразделениями предприятия (стадия «Проверка»).

Стадии процесса реализации технического изменения представлены на рис. 1 в виде плоскостей. Площадь плоскости зависит от численности персонала, участвующего в той или иной стадии. Плоскость реализации изменений площадью $(l_n \in L) \cdot (d_n \in D)$ с этапами прохождения отдельных стадий φ можно представить как

$$(L) \cdot (D) \xrightarrow{\Delta\varphi} (\text{изменение КД}),$$

$$\Delta\varphi = \langle \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \varphi_4 \rangle,$$

при этом прохождение всех стадий реализации технического изменения в виде переходов между плоскостями площадью $l \cdot d$ можно представить как

$$\xrightarrow{\varphi_1} N(l_n \cdot d_n) \xrightarrow{\varphi_2} H(l_n \cdot d_n) \xrightarrow{\varphi_3} V(l_n \cdot d_n) \xrightarrow{\varphi_4} F(l_n \cdot d_n).$$

Представим прохождение стадий реализации технического изменения в двухмерной системе координат (рис. 2). Каждая стадия имеет начальную временную метку t_0 и длительность выполнения t . Время прохождения каждого этапа зависит от степени сложности выполняемой работы.

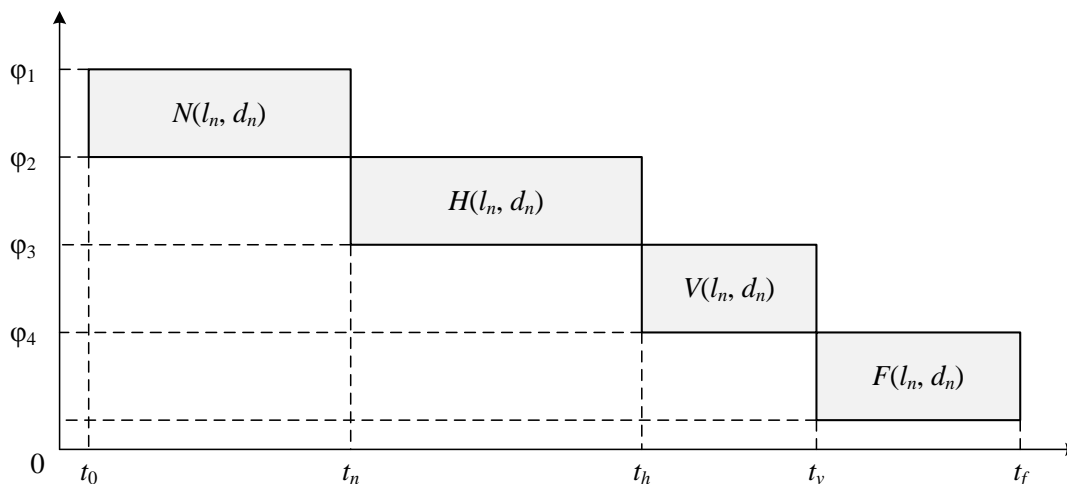


Рис. 2. Процесс реализации технических изменений в двумерной системе координат
Fig. 2. Implementation process of technical changes in 2D coordinate system

Функциональная модель реализации электронного журнала оперативной регистрации изменений

Журнал оперативной регистрации (ЖОР) изменений – это ключевой документ, обеспечивающий оперативное доведение сведений о вносимых в конструкцию выпускаемых изделий внеплановых изменений до исполнителей, непосредственно отвечающих за производство изделия, и служб предприятия, ответственных за управление производством [15]. Использование электронного журнала оперативной регистрации изменений способствует снижению производственных издержек и росту производительности предприятия при производстве опытных образцов радиоэлектронной аппаратуры.

Согласно ГОСТ 2.503–2013, журнал изменений включает следующие графы (рис. 3):

- порядковый номер изменений, общий для всех производимых изменений в одном документе;
- дата записи в журнале;
- обозначение изменяемого документа;
- содержание изменяемого участка (графическое, текстовое и т. д.), указания об использовании или доработке задела;
- должности, фамилии, подписи соответствующих лиц, дата подписания;
- сведения о внесении изменений в подлинники и копии;
- дополнительные сведения о внесении изменений.

Изм.	Дата записи	Обозначение документа	Содержание изменения	Должность, фамилия, подпись, дата	Отметка о внесении изменений в		Примечание
					подлинники	копии	
1	2	3	4	5	6	7	8

Рис. 3. Общая форма журнала изменений по ГОСТ 2.503–2013
Fig. 3. The general form of the change log in accordance with GOST 2.503–2013

Рассмотрим функциональную модель процесса создания и реализации пункта журнала оперативной регистрации изменений (рис. 4). Процесс создания ЖОР изменений инициируется входным сообщением о необходимости внесения изменений в конструкторскую документацию, которое может быть вызвано:

- ошибками в текущей версии конструкторской документации;
- несоответствием заявленных конструктивных решений технологическим требованиям производства;
- модернизацией изделия и его компонентов.

При внесении требуемых изменений исполнители руководствуются соответствующими пунктами журнала оперативной регистрации изменений. В случае несоответствий и обнаружения дефектов выписывается возвратное извещение.

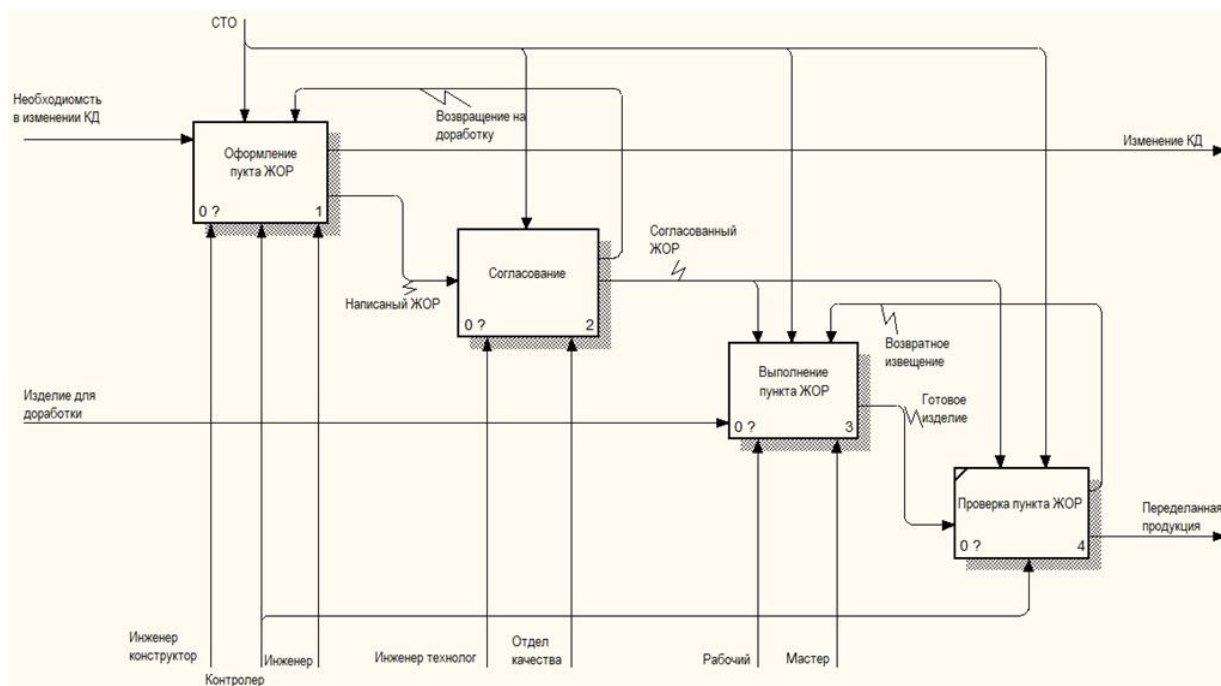


Рис. 4. Функциональная модель процесса создания и реализации пункта журнала оперативной регистрации изменений
Fig. 4. Functional model of the process of creating and implementing an item in the log of operational registration of changes

Ниже представлена декомпозиция процессов «Согласование» (рис. 5) и «Выполнение пункта журнала» (рис. 6).

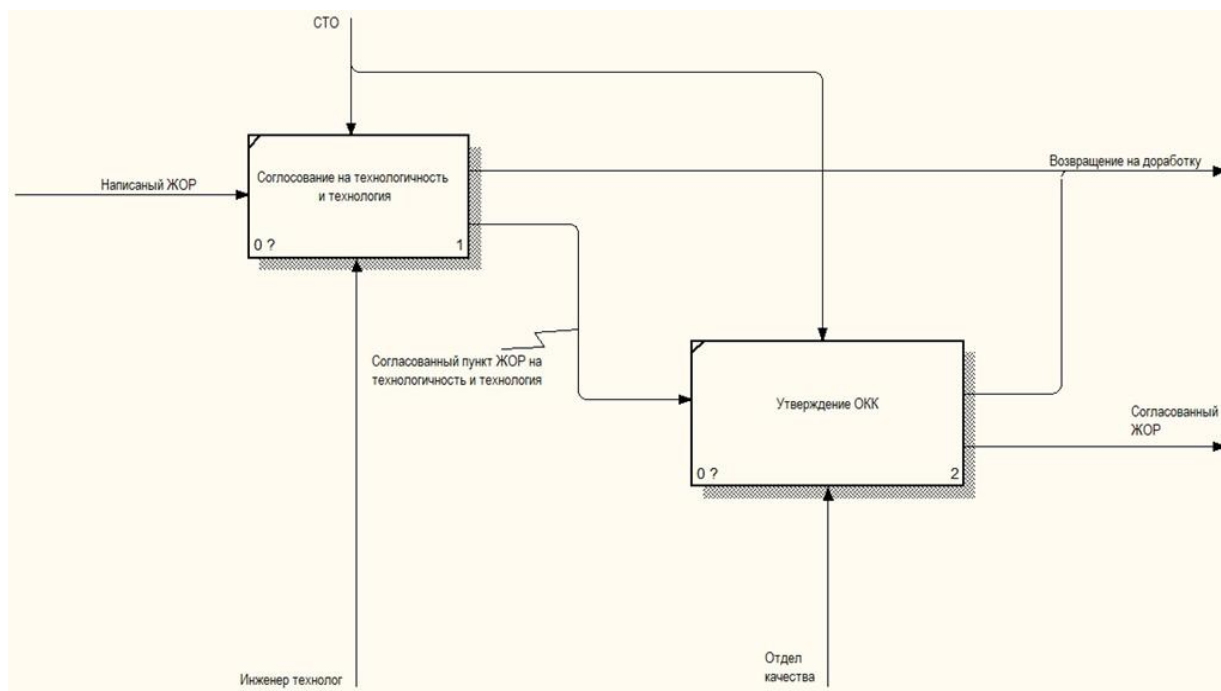


Рис. 5. Функциональная модель процесса «Согласование»
Fig. 5. Functional model of the process "Agreement"

При выполнении процесса «Согласование» (см. рис. 5) утверждается технологический процесс внесения технических изменений в изделие и выполняется согласование пункта журнала оперативной регистрации изменений с отделом контроля качества. Прохождение данных этапов согласования изменений показывает принципиальную выполнимость данного пункта технических изменений. При невозможности проведения доработок изделия или некорректном описании предлагаемого технического изменения инженер-технолог или представитель отдела контроля качества формируют замечания и предложения разработчику изделия и передают пункт изменения на доработку и внесение исправлений.

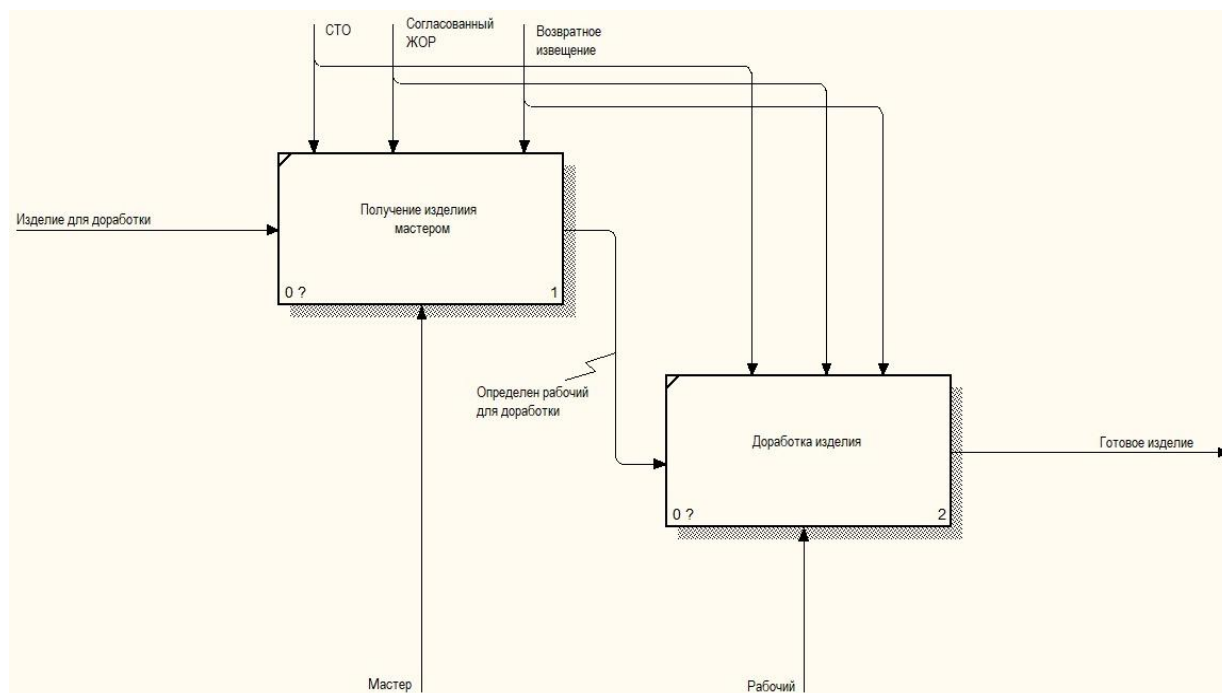


Рис. 6. Функциональная модель процесса «Выполнение пункта журнала»
Fig. 6. Functional model of the process "Execution of log item"

Собственно, доработка изделия и проверка внесенных изменений в его конструкцию выполняется в процессе «Выполнение пункта журнала» (см. рис. 6). При получении необходимого пакета документации (конструкторская документация на изделие, сопроводительные документы и описание временного технологического процесса) и самого изделия мастер цеха определяет квалифицированного исполнителя для проведения работ по доработке изделия. После завершения данных работ мастер предъявляет изделие в отдел контроля качества для проверки внесенных изменений. При положительном результате контроля качества доработка считается выполненной.

На базе проведенного анализа и рассмотренной модели процессов реализации технических изменений разработана архитектура электронного журнала оперативной регистрации изменений, представленная на диаграмме вариантов использования (рис. 7), диаграмме классов (рис. 8) и диаграмме последовательности (рис. 9) нотации UML.

На диаграмме вариантов (см. рис. 7) использования показаны актеры – участники процесса формирования и реализации технических изменений, прецеденты данного процесса и их отношения друг к другу.

На диаграмме классов (см. рис. 8) представлены объекты системы и статические отношения между ними. Она включает следующие классы: пользователь (класс user), журнал оперативной регистрации изменений (класс magazine), классы модального окна управления электронным ЖОР изменений и реализации вносимых изменений (классы developers, technologist, QCD).

В классе user реализованы функции авторизации пользователя. В классе magazine представлены функции поиска по разделам журнала изменений и управления пользовательским интер-

фейсом. Функции создания и согласования журнала оперативной регистрации изменений открывают одно из модульных окон классов developers – «Разработчики», technologist – «Инженер-технолог» и QCD – «Отдел контроля качества», в которых пользователь вводит необходимые данные и выполняет соответствующие операции.

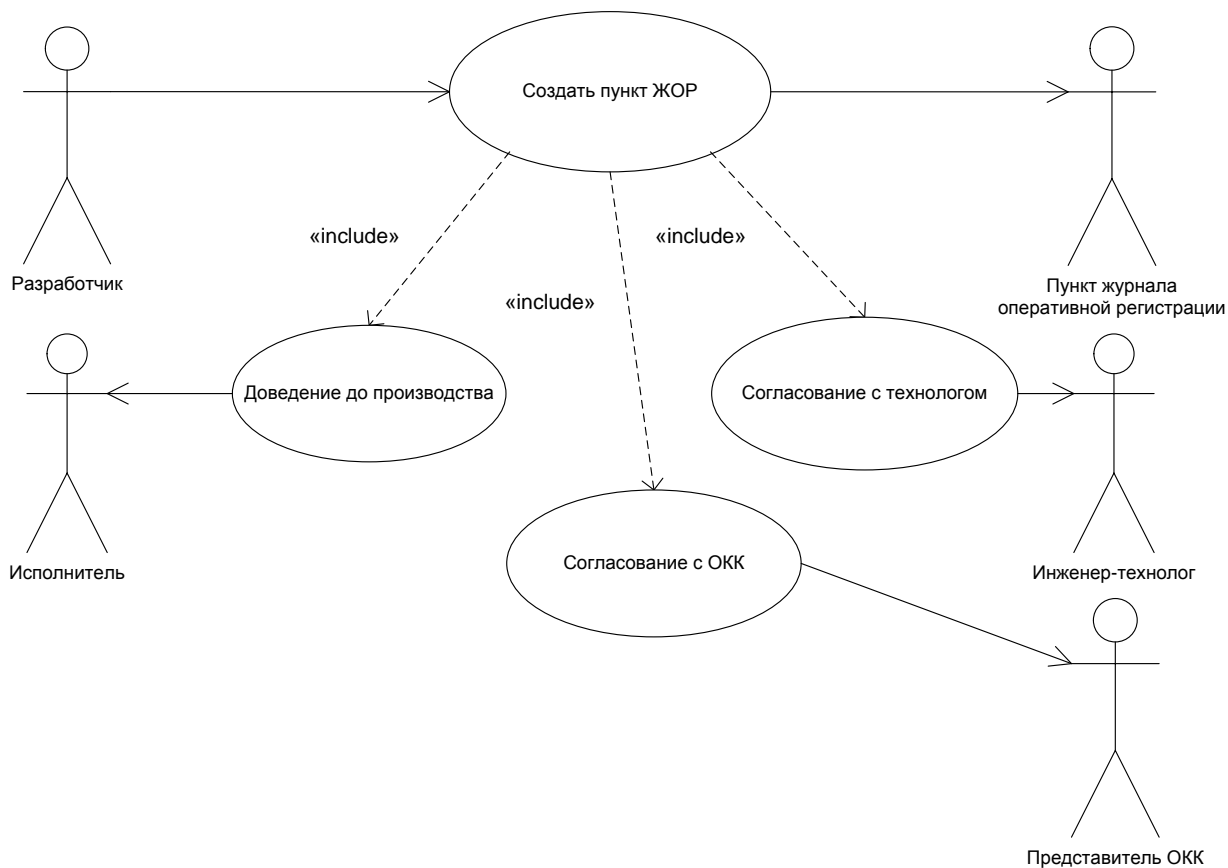


Рис. 7. Диаграмма вариантов использования
Fig. 7. Use Case Diagram

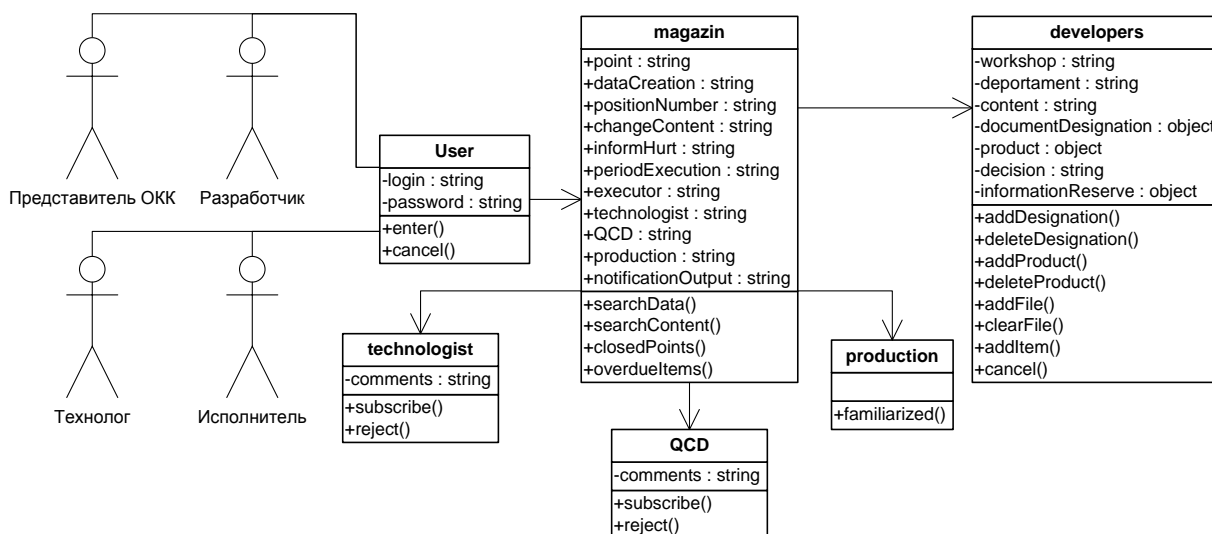


Рис. 8. Диаграмма классов
Fig. 8. Class diagram

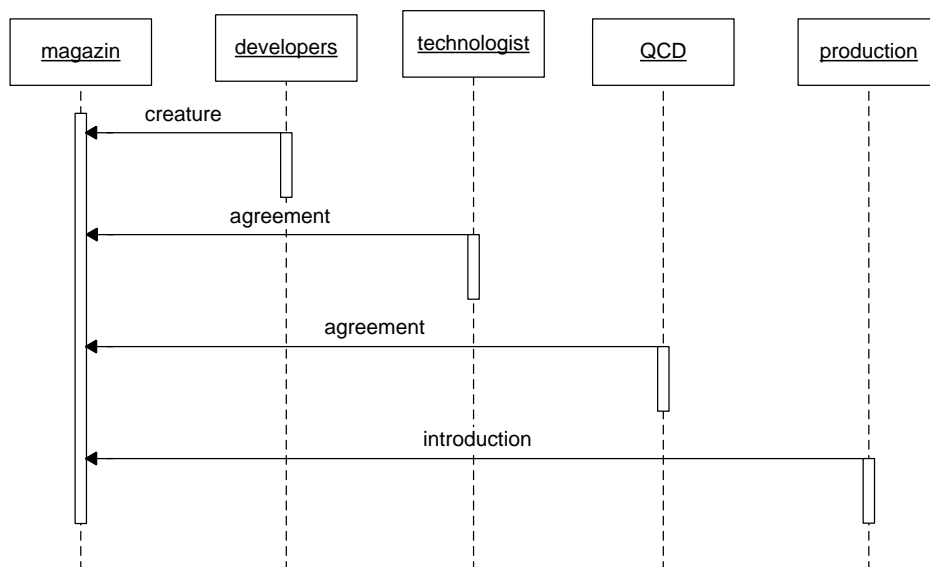


Рис. 9. Диаграмма последовательности
Fig. 9. Sequence diagram

Диаграмма последовательности (см. рис. 9) представляет взаимодействие исполнителей представленной функциональной модели процесса создания и реализации пункта журнала оперативной регистрации изменений. При этом разработчик пункта журнала изменений взаимодействует со всеми исполнителями процесса, которые не связаны между собой.

Реализация системы оперативной регистрации технических изменений

В представленной работе процессы оперативной регистрации и отслеживания изменений конструкторской документации рассматриваются на примере предприятия АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск, Россия). Его основной сферой деятельности является производство систем и аппаратных комплексов передачи данных, тропосферной, спутниковой связи и навигации. Научно-производственное предприятие «Радиосвязь» является научно-производственным комплексом радиоэлектронной промышленности, в котором проектирование является важным видом деятельности, конечным результатом которого является конструкторская документация на изделие.

На АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь» главное окно системы оперативной регистрации технических изменений конструкторской документации организовано в виде таблицы электронного журнала оперативной регистрации изменений со следующими столбцами (рис. 10):

- номер пункта журнала;
- отдел разработчика;
- обозначение документа;
- наименование изделия;
- дата создания изменения;
- цех и производственный участок, определенные для внесения изменений в изделие;
- нужный для доработки продукции цех и его участок;
- содержание изменения;
- информация о производственном заделе;
- исполнитель изменения;
- технолог, подписавший изменение;
- представитель технического контроля, согласовавший изменение;
- мастер участка, определенного для внесения изменений в изделие;
- срок внесения изменений;
- примечание;
- извещение об изменении;
- дата выпуска.

Пункт	Дата создания	Цех	Участок	Отдел	Обозначения документа	Изделие	Содержание изменения
483	07.09.2021 08:33	Цех 37	Уч. 40	Сектор 4320	030.512 - Корпус	3051	Отсутствуют 4 отв.

Принятое решение	Информация о заделе	Срок	Исполнитель	Технолог
Исполнитель: Доработать корпус (по виду В) 030.512 согласно эскизу. Передать корпус на покрытие ЛКП в 51 цех. 030.512 - Корпус.cdw	Исполнитель: Задел доработать шт.	31.12.2017	Гакман Ольга Николаевна	Васимова Ядвига Ипполитосовна 07.09.2017 08:53

Военный представитель	Мастер	ОТК	Примечание	Предварительное извещение	Дата выпуска	Извещение об изменении	Срок изменения
	Рубан Любовь Сергеевна 07.09.2017 09:11	Воронков Максим Сергеевич 13.09.2017 09:37	Нормировщик: 764-0,4; 653-0,28	4320-Р444-Д-996	07.09.2017	УЭ.2372-2017	22.11.2017

Рис. 10. Главное окно системы оперативной регистрации изменений конструкторской документации
Fig. 10. Main window of the registration system changes in design documentation

Разработчик, убедившись в наличии проблем в конструкторской документации, создает пункт электронного журнала оперативной регистрации изменений (рис. 11).

Добавить пункт [X]

Пункт Журнала

Цех: Отдел:

Обозначение документа

Обозначение	Наименование	Тип	Версия

Изделие

Обозначение	Наименование	Тип	Версия

Решение об изменении

Содержание:

Служебная:

Решение:	Цех	Решение

Файл:

Файл:

Файл:

Информация об исполнении

Указание о документе:

Срок:

Информация о заделе:

Данные из АСУП:

Рис. 11. Окно создания пункта журнала оперативной регистрации изменений
Fig. 11. Log item creation window

Для этого заполняется общее описание изменения и прикрепляются все необходимые эскизы, чертежи, технологические карты или инструкции для корректной и оперативной доработки изделия. После создания пункта в журнале оперативной регистрации изменений разработчик должен довести и согласовать вносимое изменение с технологом (рис. 12).

Инженер-технолог должен проверить пункт изменения на технологичность выполнения и описать краткий технологический процесс его выполнения в графе комментариев. В графе «Участок» инженер-технолог указывает производственный участок цеха, где будет производиться доработка изделия. В том случае, если предлагаемое изменение не отвечает технологическим возможностям предприятия, оно отклоняется. Замечания отдела технического контроля указываются в графе «Примечание», при этом предлагаемое изменение отклоняется. После устранения технологических замечания и замечаний технического контроля пункт журнала оперативной регистрации изменений подписывается.

Разработчик, внесший изменения в изделие, должен довести их до сведения мастера цеха, где будет производиться соответствующая доработка, и мастер цеха должен поставить электронную подпись. Электронная подпись подтверждает, что информация по доработке изделия доведена до производства. Мастер цеха определяет компетентного рабочего для внесения доработки в изделие и срок завершения (рис. 13).

Рис. 12. Окно согласования технического изменения с инженером-технологом
Fig. 12. Technical Change Approval Window with a process engineer

Пункт Журнала 37824	
Цех 15 Уч.33, Цех 16 Уч.6	Исполнитель:
Отдел:	Сектор 4940
Дата создания:	26.05.2023
Обозначение документа:	УЗ4.825.886(34940-22-0215)
Изделие:	
Содержание изменения:	Требуется экранировать кабель.
Служебная:	
Принятое решение:	Цех 15: Кабель № 17 (УЗ4.825.886) дополнительно оплести проволокой ММЛ до разветвления. Оплетку на корпус разъема НЕ выводить. Не допускается соприкосновение внешнего и внутреннего экранов. Цех 16: Кабель № 17 направить в цех 15 для доработки.
Прилагаемый файл:	
Информация о заказе:	Доработать 20 комплектов (заказ 207333)
Срок:	30.09.2023
Технолог:	
Военный представитель:	
Мастер:	--- /
ОТК:	--- /
Примечание:	
Технолог:	Цех 16: Отключить кабель от приборов, колодки (6 винтов М4), демонтировать из жгута (срезать 5 стяжек), уложить в бухту, передать на доработку. После доработки кабель проложить, закрепить, подключить к приборам

Рис. 13. Форма представления технического изменения для внесения доработки в изделие
Fig. 13. Technical change submission form to improve the product

После выполнения работ опытный образец изделия предъявляют в отдел контроля качества с приложенными пунктами журнала оперативной регистрации изменений. Контролер качества проверяет данную доработку на соответствие пункту ЖОР и при положительном результате ставит штамп, роспись и дату проведенной проверки. В обратном случае выписывается возвратное извещение на обработку замечаний и изделие вновь предъявляется в отдел контроля качества на повторную проверку. После внесения доработки мастер цеха передает изделие по маршруту доработки в другой цех для прохождения следующей технологической операции или, если все операции технологического процесса производятся в данном цехе, изделие возвращается в цех, где была выявлена необходимость доработки.

Заключение

Предложенная система оперативной регистрации изменений конструкторской документации позволяет в короткие сроки довести до производственных цехов предприятия сведения о предлагаемых изменениях в конструкцию опытного образца изделия, остановить производство, провести необходимые корректирующие действия и доработать изделие с минимизацией потерь на изготовление нового опытного образца. Реализованный электронный журнал оперативной регистрации изменений также позволяет вести учет количества случаев ошибок в конструкторской документации, анализировать их причины и принимать необходимые корректирующие меры. Предложенная система при постоянном применении на АО «НПП «Радиосвязь» зарекомендовала себя как эффективное средство автоматизации контроля изменений конструкторской документации.

Список литературы

1. Русских П.А., Капулин Д.В. Анализ решений для создания и реализации механизмов адаптивного планирования позаказного производства // Вестник МГТУ «Станкин». 2021. № 1 (56). С. 46–50.
2. Bachtenkirch D., Bock S. Finding efficient make-to-order production and batch delivery schedules // *European Journal of Operational Research*. 2022. Vol. 297, no. 1. P. 133–152. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.04.020
3. Швацкий А.В., Казанцев М.А., Капулин Д.В. Методы построения системы электронного документооборота неучтенной конструкторской документации на предприятии радиоэлектронной промышленности // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2014. Т. 7, № 7. С. 767–778.
4. Елтышев Д.К., Кулик В.Д. Автоматизация процессов проверки, учета и распределения электронной конструкторской документации в PLM-системе Teamcenter // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 11-3. С. 510–514.
5. Industrial blockchain based framework for product lifecycle management in industry 4.0 / X.L. Liu, W.M. Wang, H. Guo et al. // *Robotics and computer-integrated manufacturing*. 2020. Vol. 63. P. 101897. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101897
6. Artificial intelligence in product lifecycle management / L. Wang, Z. Liu, A. Liu, F. Tao // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 114. P. 771–796. DOI: 10.1007/s00170-021-06882-1
7. Conlon J. From PLM 1.0 to PLM 2.0: the evolving role of product lifecycle management (PLM) in the textile and apparel industries // *Journal of Fashion Marketing and Management: An International Journal*. 2020. Vol. 24, no. 4. P. 533–553. DOI: 10.1108/JFMM-12-2017-0143
8. Ширяев Н.В. Практика внедрения PDM/PLM-решений на отечественных предприятиях // *Автоматизация в промышленности*. 2014. № 9. С. 19–24.
9. Kadam O.B., Pirayesh A., Fatahi Valilai O. Technological Insights of Interoperable Models for Integration of CAD/PLM/PDM and ERP Modules in Engineering Change Management // *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: The Human-Data-Technology Nexus: Proceedings of FAIM 2022, June 19–23, 2022, Detroit, Michigan, USA*. Vol. 2. Cham: Springer International Publishing, 2023. P. 556–564.
10. A review of PLM impact on US and EU aerospace industry / F. Mas, R. Arista, M. Oliva et al. // *Procedia engineering*. 2015. Vol. 132. P. 1053–1060. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.595
11. Сафронов В.В., Барабанов В.Ф., Минаков С.А. Методы интеграции ECAD и PLM систем // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2011. Т. 7, № 10. С. 61–64.

12. Черников Б.В., Попов А.А. Состав комплекса информационных систем при объединении предприятий в единое информационное пространство // Информатизация и связь. 2015. № 3. С. 23–28.
13. Гордиенко Е.П. Интеграция информационных систем в рамках единого информационного пространства предприятия // Транспорт: наука, образование, производство. Воронеж, 2020. С. 62–65.
14. Никонов Ю.Ю., Голубков Г.Г. Внедрение электронной системы внесения изменений в конструкторскую документацию // Гагаринские чтения – 2019. 2019. С. 232–232.
15. Шмидт И.А., Механошин К.А., Семусева А.С. Автоматизация бизнес-процесса формирования и отправки заявки на изменение конструкторской документации // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 4. С. 244–247. DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-4-244-247

References

1. Russkikh P.A., Kapulin D.V. Analysis of solutions for the creation and implementation of adaptive planning mechanisms for make-to-order production. *Vestnik MSTU "Stankin"*. 2021;1(56):46–50. (In Russ.)
2. Bachtenkirch D., Bock S. Finding efficient make-to-order production and batch delivery schedules. *European Journal of Operational Research*. 2022;297(1):133–152. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.04.020
3. Shvatsky A. V., Kazantsev, M. A. Kapulin D.V. Methods of design of electronic document management system for unaccounted designer documentation at radioelectronic enterprise. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2014;7(7):767–778. (In Russ.)
4. Eltyshev D.K., Kulik V.D. Automatization of digital engineering documentation verification, accounting and distribution processes in Teamcenter plm-system. *The Fundamental Researches*. 2016;11-3:510–514. (In Russ.)
5. Liu X.L., Wang W.M., Guo H. et al. Industrial blockchain based framework for product lifecycle management in industry 4.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020;63:101897. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101897
6. Wang L., Liu Z., Liu A., Tao F. Artificial intelligence in product lifecycle management. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;114:771–796. DOI: 10.1007/s00170-021-06882-1
7. Conlon J. From PLM 1.0 to PLM 2.0: the evolving role of product lifecycle management (PLM) in the textile and apparel industries. *Journal of Fashion Marketing and Management: An International Journal*. 2020;24(4):533–553. DOI: 10.1108/JFMM-12-2017-0143
8. Shiryayev N.V. [Practice of implementing PDM/PLM solutions at domestic enterprises]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 2014;9:19–24. (In Russ.)
9. Kadam O.B., Pirayesh A., Fatahi Valilai O. Technological Insights of Interoperable Models for Integration of CAD/PLM/PDM and ERP Modules in Engineering Change Management. In: *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: The Human-Data-Technology Nexus: Proceedings of FAIM 2022*, June 19–23, 2022, Detroit, Michigan, USA, Vol. 2. Cham: Springer International Publishing; 2023. P. 556–564.
10. Mas F., Arista R., Oliva M. et al. A review of PLM impact on US and EU aerospace industry. *Procedia engineering*. 2015;132:1053–1060. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.595
11. Safronov V.V., Barabanov V.F., Minakov S.A. [Methods for integrating ECAD and PLM systems]. *Bulletin of Voronezh state technical university*. 2011;7(10):61–64. (In Russ.)
12. Chernikov B.V., Popov A.A. The complex of information systems for integration of companies into a single information space. *Informatization and communication*. 2015;3:23–28. (In Russ.)
13. Gordienko E.P. [Integration of information systems within a single enterprise information space]. In: *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo* [Proc. Transport: science, education, production]. Voronezh; 2020. P. 62–65. (In Russ.)
14. Nikonov Yu.Yu., Golubkov G.G. [Implementation of an electronic system for making changes to design documentation]. In: *Gagarinskie chteniya – 2019* [Proc. Gagarin readings – 2019]. 2019. P. 232–232. (In Russ.)
15. Shmidt I.A., Mehonoshin K.A., Semusheva A.S. Automation of business process of formation and sending of application for change of design documentation. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2017;4:244–247. (In Russ.) DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-4-244-247

Информация об авторах

Капулин Денис Владимирович, канд. техн. наук, доц., заведующий базовой кафедрой информационных технологий на радиоэлектронном производстве, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия; DKapulin@sfu-kras.ru.

Воронков Максим Сергеевич, аспирант, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия; Mvoronkov-a21@stud.sfu-kras.ru.

Русских Полина Андреевна, ассистент базовой кафедры информационных технологий на радиоэлектронном производстве, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия; Prusskikh@sfu-kras.ru.

Дрозд Олег Владимирович, канд. техн. наук, доц. базовой кафедры информационных технологий на радиоэлектронном производстве, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия; Odrozd@sfu-kras.ru.

Information about the authors

Denis V. Kapulin, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Basic Department of Information Technologies in Radioelectronic Production, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; DKapulin@sfu-kras.ru.

Maksim S. Voronkov, Postgraduate student of the Basic Department of Information Technologies in Radioelectronic Production, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; Mvoronkov-a21@stud.sfu-kras.ru.

Polina A. Russkikh, Assistant of the Basic Department of Information Technologies in Radioelectronic Production, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; Prusskikh@sfu-kras.ru.

Oleg V. Drozd, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Basic Department of Information Technologies in Radioelectronic Production, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; Odrozd@sfu-kras.ru.

Статья поступила в редакцию 01.06.2023

The article was submitted 01.06.2023

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ВИБРОСТЕНДЕ

О.В. Логиновский¹, loginovskiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

Г.И. Волович², g_volovich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3572-1823>

Д.В. Топольский¹, topolskiidv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9370-7851>

Н.Д. Топольский¹, topolskiind@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0522-1748>

А.Е. Беляков¹, alex.beliakov@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7823-3071>

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² ООО «Челэнергоприбор», Челябинск, Россия

Аннотация. В представленной работе рассматривается программный комплекс для обеспечения мониторинга состояния следящего гидропривода с гидростатическими направляющими в составе диагностического вибростенда для цифровых трансформаторов. Срок службы цифровых измерительных трансформаторов составляет 25 лет, а межповерочный интервал – 8 лет. Для достижения таких высоких эксплуатационных характеристик необходимо проведение большого количества испытаний для подобных изделий. Одним из таких испытаний является испытание на вибростенде. Уникальность применяемого в диагностическом вибростенде гидропривода заключается в его длительном ресурсе работоспособности в эксплуатационных нагрузках (до 100 млн циклов). Такая надежность достигается за счет применения в конструкции гидропривода специальных гидростатических направляющих и требует наличия специального программного обеспечения. Создана архитектура программного комплекса для вибростенда. Для тестирования функционала пакета выполнено имитационное моделирование работы компонентов программного комплекса. **Цель исследования:** на основе анализа функционирования технологического оборудования и вариантов реализации управляющего программного обеспечения разработать архитектуру программного комплекса для реализации системы мониторинга состояния следящего гидропривода с гидростатическими направляющими в составе диагностического вибростенда для цифровых трансформаторов. **Материалы и методы.** Поставленные научные задачи решены с применением методов системного анализа, компьютерного, математического и имитационного моделирования взаимодействия программного комплекса с компонентами следящего гидропривода с гидростатическими направляющими. **Результаты.** Основным практическим результатом проведенных исследований является разработка архитектуры программного комплекса для испытания цифровых измерительных трансформаторов на вибростенде. Предлагается при программной реализации комплекса использовать кроссплатформенные решения и опираться на современный опыт использования свободно распространяемого программного обеспечения. **Заключение.** Разработанная архитектура программного комплекса ориентирована на обеспечение автоматизированной работы следящих гидроприводов, позволяет конфигурировать все необходимые параметры оборудования, осуществлять мониторинг состояния оборудования по цифровым протоколам передачи данных, централизованно сохранять и тиражировать настройки гидроприводов под конкретные условия эксплуатации на предприятиях. Анализ вариантов реализации показал, что применение SCADA-систем упрощает процесс разработки типовых проектов диспетчерского управления и сбора данных и мониторинга состояния, но при этом имеет повышенную сложность на этапе развертывания и эксплуатации. Функционал ни одной из распространённых и надёжных SCADA-систем не покрывает всех требований к данному проекту. В частности, это относится к подключению по USB и обработке высокочастотных сигналов, предусмотренных требованиями к разработке. Помимо этого, при применении универсальных SCADA-систем конечному пользователю необходимо приобрести лицензию на RunTime компонент SCADA.

Ключевые слова: цифровой измерительный трансформатор, мониторинг состояния, вибростенд, следящий гидропривод с гидростатическими направляющими, имитационное моделирование

Благодарности. Работа выполнена за счет средств областного бюджета в виде субсидии на реализацию научно-технических проектов Челябинской области, включенных в перечень проектов Уральского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня «Передовые производственные технологии и материалы» в 2022 году (соглашение № 604 от 22.12.2022) проект «Разработка отечественного программного комплекса для управления, настройки и диагностики следящего гидропривода с гидростатическими направляющими, в рамках проекта «Разработка и создание производства следящих гидроприводов с гидростатическими направляющими (СГ с ГСН)».

Для цитирования: Разработка программного комплекса для испытания цифровых измерительных трансформаторов на вибростенде / О.В. Логиновский, Г.И. Волович, Д.В. Топольский и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 1. С. 19–31. DOI: 10.14529/ctcr240102

Original article
DOI: 10.14529/ctcr240102

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PACKAGE FOR TESTING DIGITAL INSTRUMENT TRANSFORMERS ON A VIBRATION STAND

O.V. Loginovskiy¹, loginovskiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

G.I. Volovich², g_volovich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3572-1823>

D.V. Topolskii¹, topolskiidv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9370-7851>

N.D. Topolskii¹, topolskiind@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0522-1748>

A.E. Beliakov¹, alex.beliakov@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7823-3071>

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² LLC Chelenergopribor, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The presented work examines a software package for monitoring the condition of a hydraulic servo drive with hydrostatic guides as part of a diagnostic vibration stand for digital transformers. The service life of digital instrument transformers is 25 years, and the calibration interval is 8 years. To achieve such high performance characteristics, it is necessary to conduct a large number of tests for such products. One such test is the vibration test. The uniqueness of the hydraulic drive used in the diagnostic vibration stand lies in its long service life under operational loads (up to 100 million cycles). This reliability is achieved with special hydrostatic guides in the hydraulic drive design and requires special software. The architecture of the software complex for the vibration stand has been created. To test the functionality of the package, simulation modeling of the operation of the components of the software package was performed. **Aim.** Based on the analysis of the functioning of technological equipment and options for implementing control software, develop the architecture of a software package for implementing a system for condition monitoring of a servo hydraulic drive with hydrostatic guides as part of a diagnostic vibration stand for digital transformers. **Materials and methods.** The stated scientific problems were solved using methods of system analysis, computer, mathematical and simulation modeling of the interaction of the software complex with the components of the servo hydraulic drive with hydrostatic guides. **Results.** The main practical result of the research is the development of the architecture of a software package for testing digital instrument transformers on a vibration stand. It is proposed to use cross-platform solutions when implementing the complex software and rely on modern experience in using freely distributed software. **Conclusion.** The developed architecture of the software package is focused on ensuring the automated operation of servo hydraulic drives, allows you to configure all the necessary equipment parameters, monitor the condition of the equipment using digital data transfer protocols, centrally save and replicate hydraulic drive settings for specific operating conditions on the enterprises. Analysis of implementation options showed that the use of a SCADA system simplifies the process of developing standard projects for dispatch control and data collection and condition monitoring, but at the same time, it has increased complexity at the stage of deployment and operation. The functionality of none of the widespread and reliable SCADA systems covers all the requirements for this project. This particularly applies to USB connectivity and high frequency signal processing required by design requirements. In addition, when using universal SCADA systems, the end user must purchase a license for the RunTime SCADA component.

Keywords: digital instrument transformer, condition monitoring, vibration stand, hydraulic servo drive with hydrostatic guides, simulation modeling

Acknowledgments. The study was executed due to the Chelyabinsk region budget by subsidizing of scientific-technical projects from roster study projects of the world-class Interregional Ural Scientific and Educational Institution “Forward Industrial Technologies and Materials” in 2022 (contract number 604, 12/22).

For citation: Loginovskiy O.V., Volovich G.I., Topolskii D.V., Topolskii N.D., Beliakov A.E. Development of a software package for testing digital instrument transformers on a vibration stand. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2024;24(1):19–31. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240102

Введение

В связи с растущим глобальным интересом к разработке будущих интеллектуальных сетей большое внимание уделяется нетрадиционным измерительным трансформаторам (ИТ). В отличие от классического трансформатора тока с магнитным сердечником, электронный трансформатор тока не имеет насыщения, имеет небольшой объем и может генерировать цифровой сигнал, соответствующий новейшим протоколам цифровой связи, таким как IEC61850. Традиционные ИТ являются весьма совершенными устройствами, однако имеют по сравнению с электронными (цифровыми) ИТ и целый ряд других недостатков, таких как значительные массогабаритные характеристики, опасность возникновения пожара и взрыва. Цифровые ИТ должны прийти на замену традиционным электромагнитным трансформаторам, которые находятся в эксплуатации. Стоимость оборудования измерительных комплексов токов и напряжения, затраты на монтаж, транспортирование и эксплуатацию при использовании комбинированных цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения значительно ниже, чем при использовании традиционных ИТ.

В исследовании рассматривается программный комплекс для обеспечения мониторинга состояния следящего гидропривода с гидростатическими направляющими в составе диагностического вибростенда для цифровых трансформаторов. Программный комплекс предназначен для управления, наладки и диагностики параметров исполнительных механизмов следящего гидропривода с гидростатическими направляющими. Целью создания программного комплекса является обеспечение автоматизированной работы следящего гидропривода в составе диагностического стенда в режиме реального времени. Задание частоты воздействия на объект испытания осуществляется путем передачи энергии от насосной установки через специализированную платформу посредством обработки сигналов, получаемых от системы управления.

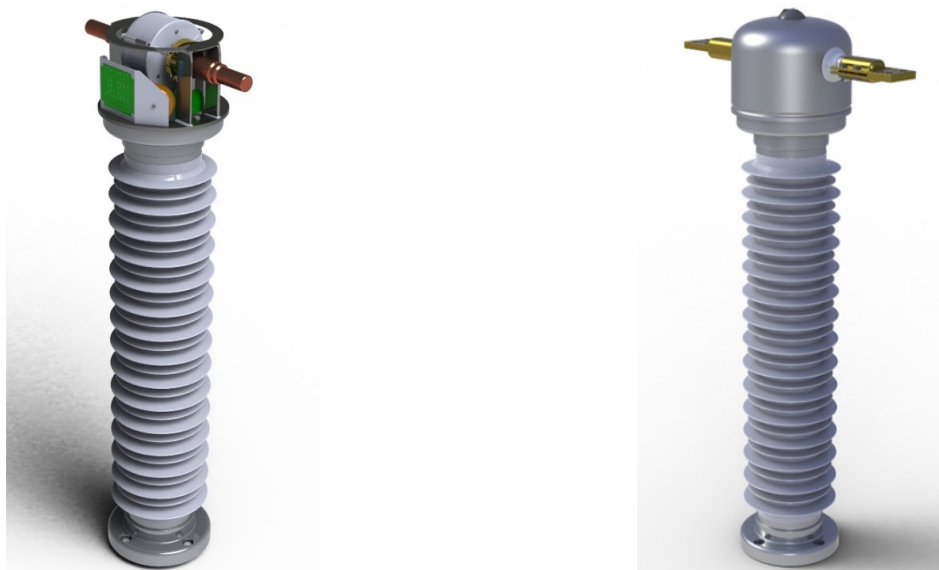


Рис. 1. Цифровой измерительный трансформатор TRATON-110
Fig. 1. Digital instrument transformer TRATON-110

Объектом испытания является цифровой комбинированный трансформатор тока и напряжения (ЦКТТН). ЦКТТН разработан компанией «Челэнергоприбор» (рис. 1). Трансформатор пред-

назначен для высокоточных измерений переменного тока и напряжения для классов напряжений 110–220 кВ с диапазоном измерений тока 300–2000 А, класса точности 0,2S по току и 0,2 по напряжению. Срок службы таких трансформаторов составляет не менее 25 лет, а межповерочный составляет интервал 8 лет. По этой причине подобному оборудованию помимо опытной эксплуатации [1] требуются еще и испытания на эксплуатационную надежность, для которых применяются вибростенды [2].

Применяемый в диагностическом стенде гидропривод обладает ресурсом работоспособности в эксплуатационных нагрузках до 100 млн циклов. Подобная работоспособность достигается за счет применения специальных гидростатических направляющих в конструкции гидропривода.

1. Постановка задач

Следящие гидроприводы с гидростатическими направляющими применяются в испытательных стендах – обеспечивают нагрузку на объект испытания [3–6]. На испытательных стендах изделия, конструкции и материалы проходят проверку на прочность в условиях, близких к эксплуатационным [7, 8]. До 2021 года следящий гидропривод был на 100 % импортного производства. В каждом стенде количество гидроприводов варьируется от 2 до 16, что объясняет высокую долю стоимости гидроприводов импортного изготовления относительно общей стоимости стенда, изготовленного в условиях Уральского инжинирингового центра (УРИЦ) [9]. В качестве исходного импортного образца были взяты гидроприводы японской компании Yuken [10]. Недостатком японского оборудования, находящегося в УРИЦ, является аналоговое управление, поэтому для удобства коммуникации между следящими гидроприводами и программным комплексом разрабатываются цифровые интерфейсы передачи данных по USB и Ethernet в режиме SRT (Soft-Real-Time) [11].

В состав диагностического вибростенда (рис. 2) входит следящий гидропривод, включающий 3 компонента: гидроцилиндр с гидростатическими направляющими (ГП с ГСН), электрогидравлический усилитель мощности (ЭГУМ), датчик положения (ДП), стендовое испытательное оборудование, платформа, на которой располагается объект испытаний (ЦКТН), а также персональный компьютер (ПК), на котором базируется программный для обеспечения мониторинга состояния гидропривода с гидростатическими направляющими.

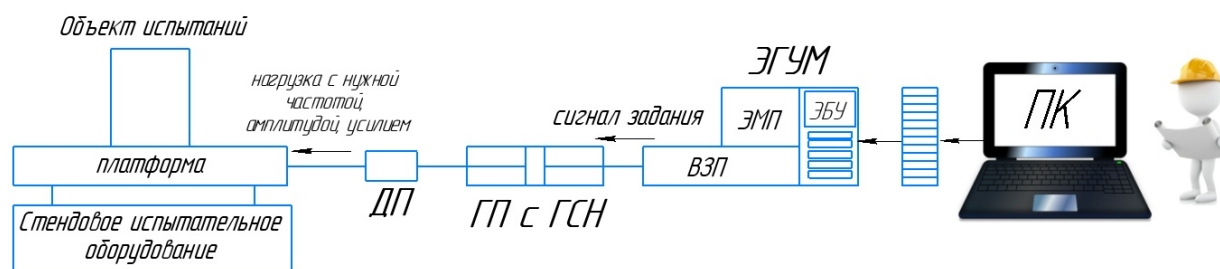


Рис. 2. Состав диагностического вибростенда
Fig. 2. The composition of the diagnostic vibration stand

Цифровая передача данных между следящим гидроприводом и программным комплексом в режиме SRT обеспечивает оперативный мониторинг текущего состояния отдельных параметров оборудования с частотой от единиц до десятков герц. Режим SRT не позволяет в реальном времени считывать данные осциллограмм с отсчетами в микросекунды, поэтому в программный комплекс заложены алгоритмы пакетной передачи данных.

Разрабатываемый в проекте ЭГУМ включает электронный блок управления (ЭБУ) на базе микроконтроллера STM32 или его аналога со встроенной поддержкой USB и двумя Ethernet через плату-преобразователь (Ethernet в RS-485). Также в состав ЭГУМ входит высокочастотная золотниковая пара (ВЗП), соединенная с электромеханическим преобразователем (ЭМП). Протоколом взаимодействия ЭБУ с программным комплексом является Modbus RTU и Modbus TCP, удовлетворяющие режиму SRT.

Программный комплекс осуществляет мониторинг состояния ГП с ГСН посредством подключения к ДП и ЭГУМ по USB (виртуальный COM-порт, протокол Modbus RTU) и Ethernet (протокол Modbus TCP). IP-адрес оборудования возможно задать в настройках программы. По Modbus реализуется функционал считывания и записи параметров оборудования, а также пакетный режим сбора измеренных показаний для визуализации в виде графиков в модуле. Программа автоматически при запуске определяет тип оборудования с подстройкой интерфейса под него.

Программный комплекс включает модуль с графическим интерфейсом, устанавливаемый на рабочее место оператора и облачную систему хранения собранных с приборов данных (рис. 3).

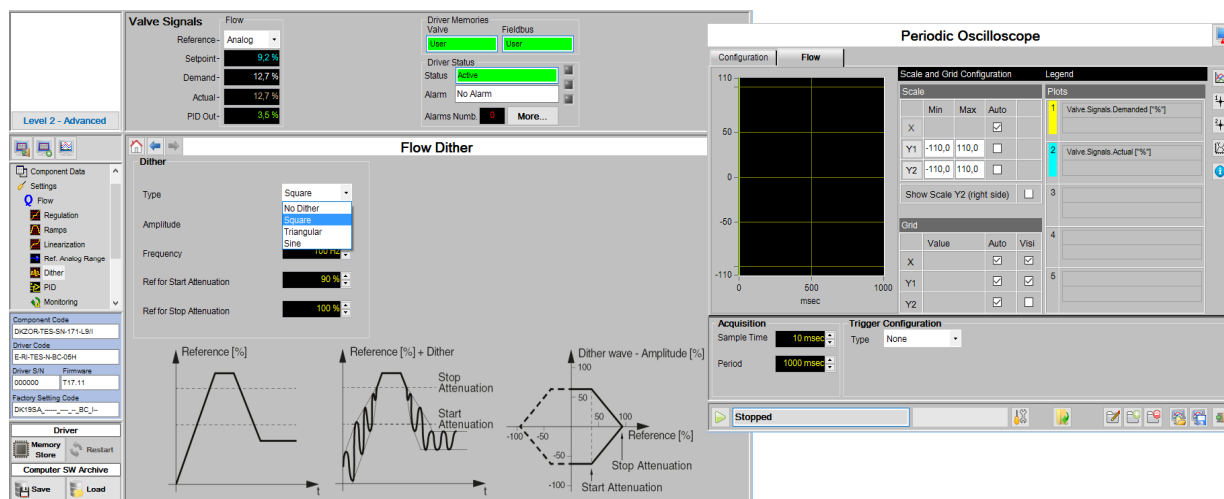


Рис. 3. Интерфейс модуля конфигурирования и мониторинга гидропривода
Fig. 3. Interface of the hydraulic drive configuration and monitoring module

Программный комплекс выполняет функции управления, наладки и диагностики параметров исполнительных механизмов следящего гидропривода с гидростатическими направляющими для обеспечения его автоматизированной работы в режиме, близком к реальному времени. Программный комплекс должен быть совместим с компонентами гидроприводов, производством которых занимается УриЦ. Важным аспектом программного комплекса является кроссплатформенность и возможность работы на отечественных операционных системах (ОС). Поддержка модели SaaS (software as a service) позволяет перенести с предприятия все модули, кроме модуля взаимодействия с ЭГУМ (по USB и Ethernet), в локальное или удаленное облако, техническое обслуживание которого может выполнять поставщик программного обеспечения. При разработке программного комплекса должен использоваться язык программирования высокого уровня: C, C++, PASCAL, PHP, Python – определяется в процессе разработки.

2. Обоснование выбора пути решения задач проекта по созданию программного комплекса

При реализации систем мониторинга состояния всегда возникает проблема выбора вариантов реализации программной части. Проблема заключается в обоснованном выборе между созданием проекта в универсальной SCADA-системе и разработкой нового проприетарного программного обеспечения (ПО) от производителя оборудования.

Для обоснованного выбора варианта инструментального ПО необходимо рассмотреть критерии, относящиеся не только к этапу разработки, но и то, какой пользовательский опыт будет давать в результате полученное прикладное ПО. Сравнение вариантов применения универсальных SCADA-систем и написания полностью новой программы на языке программирования общего назначения применительно к задаче разработки программного комплекса для мониторинга состояния следящего гидропривода приведено в таблице.

Анализ вариантов реализации программного комплекса

Table

Analysis of software package implementation options

№ п/п	Критерий анализа	Проект в универсальной SCADA	Разработка нового собственного ПО	Новое ПО
1	Простота использования среды программирования	В основном интерфейс drag-and-drop с возможностью написания сценариев	Требуется знание языка программирования общего назначения	Нет
2	Кривая обучения	Пользователи с опытом работы со SCADA могут найти его более простым в использовании	Крутая кривая обучения для тех, кто не знаком с программированием на языке программирования общего назначения	Нет
3	Формат поставки	Как правило, RunTime-компонент SCADA и прикладное ПО для запуска на нём поставляется отдельными дистрибутивами	Поставляется одним дистрибутивом	Да
4	Развертывание	Развертывание требует более сложной установки, включая установку RunTime-компонента SCADA, копирования проекта прикладной программы, настройку сетевых соединений и серверов	Развертывание с помощью инсталлятора, а также возможна переносимая версия, не требующая установки	Да
5	Лицензирование	Требуется лицензия на RunTime-компонент SCADA	Лицензия на стороннее ПО не требуется	Да
6	Формат лицензирования	Как правило, USB-ключ или привязка к аппаратной конфигурации ПК	Дополнительных лицензий не требуется, нет никаких ограничений в использовании	Да
7	Соблюдение принципов SAAS-технологий	Существуют клиент-серверные SCADA, при этом, как правило, предполагается размещение клиента и сервера на разных компьютерах	Отдельную программу можно сделать по клиент-серверной архитектуре. Например, таким образом, чтобы сервером выступал сам ЭГУМ	Да
8	Гибкость	Ограниченные возможности настройки и управления из-за предварительно созданного пользовательского интерфейса с фиксированной функциональностью	Обеспечивает максимальную гибкость в плане настройки и возможностей управления	Да
9	Обработка высокочастотных сигналов	Штатно не поддерживается, требуется написание дополнительного компонента	Высокая гибкость в реализации, поскольку есть доступ к низкоуровневым функциям системы	Да
10	Совместимость с аппаратным обеспечением	Не поддерживает USB. Интерфейс USB для сервисной настройки ЭГУМ предпочтительнее, чем RS-485, как более современный и доступный на ПК	Поддерживает USB	Да
11	Самодиагностика	Частичная, для полного соответствия требованиям нужно разрабатывать дополнительные компоненты	Высокая гибкость в реализации, можно полностью выполнить требования	Да

Окончание таблицы
Table (end)

№ п/п	Критерий анализа	Проект в универсальной SCADA	Разработка нового собственного ПО	Новое ПО
12	Совместимость с ОС и другим ПО	Низкая. Прикладная программа получается привязанной к конкретной версии SCADA, которая, в свою очередь, выпускается под конкретную версию ОС. Также нередки случаи конфликта SCADA разных производителей	Возможность сделать кросс-платформенное ПО с минимумом зависимостей и конфликтов	Да
13	Используемые языки программирования	В распространённых и надёжных SCADA не поддерживается ни один из перечисленных в требованиях к разработке	Высокая гибкость в реализации, можно полностью выполнить требования	Да
14	Реализация аналоговых систем	Нет примеров на рынке следящих приводов	Производители следящих приводов используют данный подход	Да
15	Защита от копирования и информационная безопасность	Низкая, поскольку имеется необходимость передавать пользователю файлы из проекта прикладной программы	Высокая в силу того, что итоговая программа может быть скомпилирована и зашифрована	Да
16	Применимость для пусконаладочных работ	Низкая, так как высока сложность установки и подключения, а также вероятны конфликты с другими SCADA, установленными на инженерной станции	Зависит от реализации. У большинства аналогов – хорошая применимость в полевых условиях работы	Да

Результаты проведенного анализа указывают на преимущества создания нового проприетарного ПО при программной реализации программного комплекса для мониторинга состояния следящего гидропривода. В соответствии с выбором данного варианта реализации программного комплекса вытекают нижеприведенные решения по определению технических требований к средствам создания ПО.

Кроссплатформенность модуля сбора данных, его локальная установка на компьютер, непосредственно подключенный к ЭГУМ, достаточная для работы SRT производительность, простота установки накладывают ограничения на выбор технологий разработки ПО и, как следствие, архитектуру программного комплекса.

Собранные программным модулем данные хранятся на сервере (облаке) в реляционной базе данных (БД). Поддерживается автономная работа модуля с ранее сохраненными данными без подключения к оборудованию. Также в БД сохраняются журналы событий (лог-файлы) работы программы и журналы событий программных и аппаратных ошибок с возможностью просмотра из программы. Данные осциллограмм в виде массива точек для экономии ресурсов и места в БД хранятся в BLOB-полях.

Дистрибутив программного комплекса получает уникальный идентификационный номер. Разрабатываемый генератор номеров может осуществлять привязку номера к уникальным аппаратным параметрам оборудования (например, микроконтроллер ЭГУМ).

Поддерживаемые ОС программного модуля и серверной системы управления базами данных: Windows 10 и выше, Linux Debian 10 и выше, Astra Linux 1.7.3 и выше.

Система управления базами данных: PostgreSQL 15. Данная СУБД характеризуется высокой скоростью работы, поддержкой разнообразных видов индексов, репликации и JSON. Также в сетевую часть комплекса можно заложить горизонтальное масштабирование по собранным данным, не имеющим ограничения ссылочной целостности. Зачастую именно БД – узкое место производительности системы, поэтому масштабирование решает эту проблему.

Язык разработки: C#, платформа .NET 7 [12]. Среда разработки: JetBrains Rider, основная библиотека графических компонент: Avalonia UI [13], фреймворк GUI – Model-View-ViewModel [14].

Дополнительные программные библиотеки, такие как Modbus [15], графопостроитель, разрабатываются частично самостоятельно в рамках программного комплекса, элементы библиотек берутся из свободных источников (репозиториях) с открытым исходным кодом.

Всё программное обеспечение, необходимое для функционирования программного комплекса, – свободное.

Инсталлятор комплекса устанавливает все необходимое ПО со всеми зависимостями. Установленный на компьютер оператора гидропривода программный модуль не должен конфликтовать с другим установленным программным обеспечением.

3. Имитационное моделирование взаимодействия программного комплекса с компонентами вибростенда

Проверка адекватности взаимодействия разрабатываемого программного комплекса с компонентами следящего гидропривода выполнена путем проведения имитационного моделирования. Для этих целей разработан и протестирован программный модуль взаимодействия с ЭБУ, а также была разработана плата-имитатор ЭБУ с микроконтроллером STM32 [16], подключенная по USB (виртуальный COM-порт) к компьютеру (рис. 4).

Адресное пространство ЭБУ включает 65 535 16-битных регистров Modbus. Старшая половина адресов с 32 768 до 65 535 отводится на буфер осциллограммы, содержащей точки графика с микросекундными интервалами измерений, считывание происходит полным диапазоном. Доступ к другим параметрам осуществляется через отдельные регистры.

Целью имитационного моделирования являлась оценка скорости считывания и записи отдельных параметров, а также пакетный режим считывания точек графиков, характеризующих состояние следящего гидропривода с гидростатическими направляющими. Плата реализует вычисление биквадратного фильтра. При моделировании были задействованы функции 3 (Read Multiple Registers) и 6 (Write Single Register).

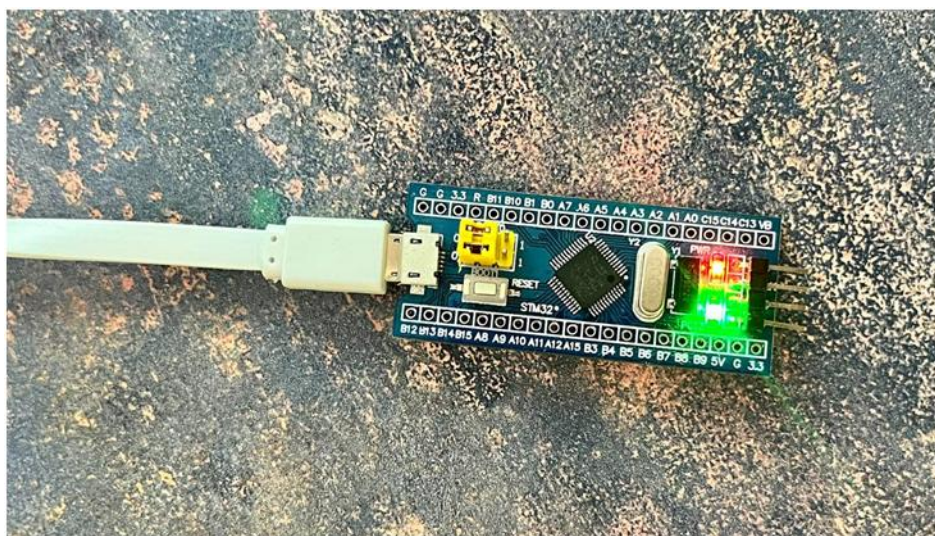


Рис. 4. Плата-имитатор ЭБУ
Fig. 4. Electronic control unit signal simulator

Modbus-регистры доступны для чтения и записи по адресам, начиная с нулевого:

- регистры с 0-го по 5-й содержат коэффициенты числителя (a_0, a_1, a_2) и знаменателя (b_0, b_1, b_2) биквадратного фильтра, умноженные на 10000 с округлением до целого 16-битного значения;
- регистры 6, 7 содержат начальные значения двух регистров задержки фильтра;
- регистр 8 содержит значение на входе фильтра.

При записи любого из этих регистров микроконтроллер пересчитывает переходный процесс на выходе фильтра и записывает его по адресам 10–124 (рис. 5).

	Alias	00000	Alias	00020	Alias	00040	Alias	00060	Alias	00080	Alias	00100	Alias	00120
0	A0	10000		-14939		-1498		185		79		8		0
1	A1	-10000		-8207		899		414		47		-4		-2
2	A2	0		4341		2158		258		-19		-11		-1
3	B0	10000		11235		1402		-89		-59		-7		0
4	B1	-10000		7589		-410		-306		-43		1		1
5	B2	8400		-1848		-1588		-231		6		8		
6	Z1	0		-8223		-1244		25		42		6		
7	Z2	0		-6670		90		220		37		0		
8	INPUT	30000		237		1135		198		1		-5		
9		0		5840		1059		13		-29		-5		
10		30000		5641		105		-153		-31		0		
11		30000		735		-784		-164		-5		3		
12		4800		-4003		-873		-35		20		4		
13		-20400		-4621		-214		102		25		1		
14		-24432		-1258		519		132		8		-2		
15		-7296		2623		699		46		-12		-3		
16		13226		3680		263		-64		-19		-1		
17		19355		1476		-324		-103		-8		1		
18		8244		-1614		-545		-49		7		2		
19		-8013		-2855		-272		37		15		1		

Рис. 5. Карта регистров
Fig. 5. Map of registers

Пример установленных параметров, содержащихся в регистрах с 0-го по 8-й:

$a_0 = 1,00$; $a_1 = -1,00$; $a_2 = 0,00$;

$b_0 = 1,00$; $b_1 = -1,00$; $b_2 = 0,84$;

$z_1 = 0,00$; $z_2 = 0,00$; $in = 3,00$.

Считанные данные из регистров с 10-го по 124-й представлены на рис. 6.

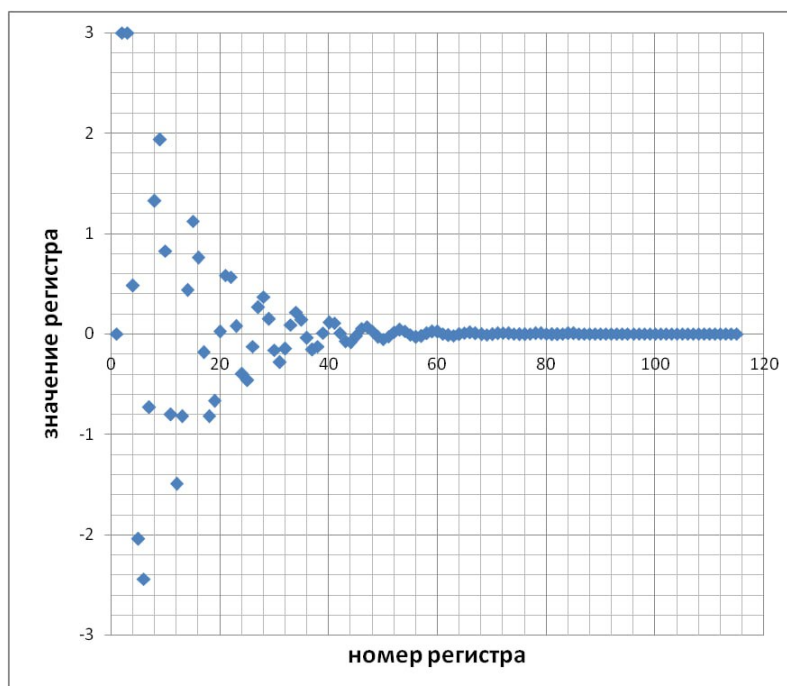


Рис. 6. Считанные данные из регистров 10–124
Fig. 6. Read data from registers number 10 to 124

Временные конфигурационные параметры: скорость передачи данных по com-порту 115 200 бит/с; пауза перед операцией чтения 20 мс, пауза перед операцией записи 50 мс.

Исходный код на C# алгоритма ввода-вывода данных имитатора (рис. 7).

```
client.PortName = "COM3";
client.BaudRate = 115200;
client.ReadPause = 20;
client.WritePause = 50;

const double input = 3;
client.WriteSingleRegister(1, 8, (ushort) (short) (input*10000));

double[] parms = client.ReadHoldingRegisters(1, 0, 9)
    .Select(p => ((short) p)/10000.0)
    .ToArray();

Console.WriteLine($"a0={parms[0],5:F2}; a1={parms[1],5:F2}; a2={parms[2],5:F2}");
Console.WriteLine($"b0={parms[3],5:F2}; b1={parms[4],5:F2}; b2={parms[5],5:F2}");
Console.WriteLine($"z1={parms[6],5:F2}; z2={parms[7],5:F2}; in={parms[8],5:F2}");

double[] values = client.ReadHoldingRegisters(1, 9, 115)
    .Select(p => ((short) p)/10000.0)
    .ToArray();
```

Рис. 7. Алгоритм ввода-вывода данных имитатора
Fig. 7. Data input-output algorithm of the Electronic control unit signal simulator

Время работы программы, включающей алгоритмы записи одного параметра, пересчета фильтра, считывания параметров и графика, составило 0,14 с. Время только считывания пакета координат – 0,04 с, примерно равно времени считывания 9 регистров. Пакет координат можно считывать 30 раз в секунду. Это в полной мере отвечает требованиям к разработке программного комплекса для обеспечения мониторинга состояния следящего гидропривода с гидростатическими направляющими.

Выводы

На основе анализа функционирования технологического оборудования и управляющего программного обеспечения создана архитектура программного комплекса для следящего гидропривода с гидростатическими направляющими в составе вибростендов для испытания цифровых трансформаторов. Разработанная архитектура программного комплекса ориентирована на обеспечение автоматизированной работы следящих гидроприводов, позволяет конфигурировать все необходимые параметры оборудования, осуществлять мониторинг состояния оборудования по цифровым протоколам передачи данных, централизованно сохранять и тиражировать настройки гидроприводов под конкретные условия эксплуатации на предприятиях.

Анализ вариантов реализации показал, что применение SCADA-систем упрощает процесс разработки типовых проектов диспетчерского управления и сбора данных и мониторинга состояния, но при этом имеет повышенную сложность на этапе развертывания и эксплуатации. Функционал ни одной из распространенных и надёжных SCADA-систем не покрывает всех требований к данному проекту. В частности, это относится к подключению по USB и обработке высокочастотных сигналов, предусмотренных требованиями к разработке. Помимо этого, при применении универсальных SCADA-систем конечному пользователю необходимо приобретать лицензию на RunTime-компонент SCADA. Таким образом, качественное и полностью соответствующее требуемому функционалу прикладное ПО реализовать на основе универсальных SCADA-систем не представляется возможным либо это потребует разработки дополнительных компонентов на языке программирования общего назначения.

Тестирование функционала пакета, выполненное методом имитационного моделирования на основе создания платы-имитатора ЭБУ, показало надежное взаимодействие компонентов программного комплекса с оборудованием вибростенда. Временные задержки на обмен и обработку технологической информации мониторинга состояния соответствуют требованиям к разработке программного комплекса.

Список литературы

1. Volovich G.I., Kirpichnikova I.M., Topolskiy D.V. Experimental operation of the adaptive electronic instrument transformer of current and voltage // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). St. Petersburg, Russia, 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076216
2. A New Vibration Testing Platform for Electronic Current Transformers / Z. Li et al. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2019. Vol. 68, no. 3. P. 704–712. DOI: 10.1109/TIM.2018.2854939
3. Анализ перспективы развития мехатронных систем на примере электрогидроцилиндра повышенной эффективности / А.Е. Карамгужинова, В.Н. Кузнецова, В.В. Савинкин, Д.А. Коптяев // Вестник СибАДИ. 2020. № 17 (1). С. 22–31. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-22-31
4. Пашков Е.В., Крамарь В.А., Кабанов А.А. Следящие приводы промышленного технологического оборудования: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2022. 368 с.
5. Проектирование автоматизированных станков и комплексов: учеб.: в 2 т. / [В.М. Утенков и др.]; под ред. П.М. Чернянского. 2-е изд., испр. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. Т. 1. 331 с.
6. Свешников В.К. Станочные гидроприводы: справ. М.: Машиностроение, 2008. 640 с.
7. Зеленко О.В., Егорычев А.И. Программная реализация протокола ModBus на основе электронного модуля ввода-вывода // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/programmная-realizatsiya-protokola-modbus-na-osnove-elektronnogo-modulya-vvoda-vyvoda> (дата обращения: 16.12.2023).
8. Ефимова Ю.В. Автоматизированная система визуализации с передачей параметров по протоколу MODBUS // Форум молодых ученых. 2018. № 12-2 (28). С. 512–521.
9. Проект ЮУрГУ по производству следящих гидроприводов получил федеральную поддержку // Южно-Уральский государственный университет: сайт. URL: <https://www.susu.ru/ru/news/2023/01/11/proekt-po-proizvodstvu-sledyashchih-gidroprivodov-poluchil-federalnuyu-podderzhku> (дата обращения: 16.12.2023).
10. Servo Valve Design for Faster Response in Motion Systems and also Low Contamination Susceptibility // Yuken Europe: website. URL: <https://yukeneurope.com/whitepaper-servo-valve-design-for-faster-response-in-motion-systems-and-also-low-contamination-susceptibility> (дата обращения: 16.12.2023).
11. PROFINET – Real-time communication in the field // Siemens: website. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industrial-communication/profinet.html> (дата обращения: 16.12.2023).
12. Rider: The Cross-Platform .NET IDE from JetBrains // JetBrains: website. URL: <https://www.jetbrains.com/rider/> (дата обращения: 16.12.2023).
13. Avalonia UI // Avalonia. URL: <https://avaloniaui.net/> (дата обращения: 16.12.2023).
14. Model-View-ViewModel // Microsoft Learn: website. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/architecture/maui/mvvm> (дата обращения: 16.12.2023).
15. Just about Modbus RTU with detailed description and examples // IPC2U: website. URL: <https://ipc2u.ru/articles/prostye-resheniya/modbus-rtu/> (дата обращения: 16.12.2023).
16. STM32 32-bit Arm Cortex MCUs // ST: website. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html> (дата обращения: 16.12.2023).

References

1. Volovich G.I., Kirpichnikova I.M., Topolskiy D.V. Experimental operation of the adaptive electronic instrument transformer of current and voltage. In: *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. St. Petersburg, Russia; 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076216
2. Li Z. et al. A New Vibration Testing Platform for Electronic Current Transformers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019;68(3):704–712. DOI: 10.1109/TIM.2018.2854939
3. Karamguzhinova A.E., Kuznetsova V.N., Savinkin V.V., Koptyaev D.A. Electrohydrocylinder of increased efficiency: prospects for the development of mechatronic systems. *The Russian*

Automobile and Highway Industry Journal. 2020;17(1):22–31. (In Russ.) DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-22-31

4. Pashkov E.V., Kramar' V.A., Kabanov A.A. *Sledyashchie privody promyshlennogo tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Servo drives for industrial process equipment]. St. Petersburg: Lan Publ.; 2022. 368 p. (In Russ.)

5. Utenkov V.M. et al.; Chernyanskiy P.M. (Ed.) *Proektirovanie avtomatizirovannykh stankov i kompleksov: ucheb.* [Design of automated machines and complexes: textbook]. 2nd ed. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ.; 2014. Vol. 1. 331 p. (In Russ.)

6. Sveshnikov V.K. *Stanochnye gidroprivody: spravochnik* [Machine hydraulic drives: reference book]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2008. 640 p. (In Russ.)

7. Zelenko O.V., Egorychev A.I. [Software implementation of the ModBus protocol based on an electronic I/O module]. *Herald of Kazan technological university*. 2014;6. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/programmaya-realizatsiya-protokola-modbus-na-osnove-elektronnogo-modulya-vvoda-vyvoda> (accessed 16.12.2023).

8. Efimova Y.V. Automated imaging system with the transfer parameters for MODBUS protocol. *Forum molodykh uchenykh*. 2018;12-2(28):512–521. (In Russ.)

9. The SUSU project for the production of tracking hydraulic drives received federal support. *South Ural State University: website*. (In Russ.) Available at: <https://www.susu.ru/ru/news/2023/01/11/proekt-po-proizvodstvu-sledyashchih-gidroprivodov-poluchil-federalnuyu-podderzhku> (accessed 16.12.2023).

10. Servo Valve Design for Faster Response in Motion Systems and also Low Contamination Susceptibility. *Yuken Europe: website*. Available at: <https://yukeneurope.com/whitepaper-servo-valve-design-for-faster-response-in-motion-systems-and-also-low-contamination-susceptibility> (accessed 16.12.2023).

11. PROFINET – Real-time communication in the field. *Siemens: website*. Available at: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industrial-communication/profinet.html> (accessed 16.12.2023).

12. Rider: The Cross-Platform .NET IDE from JetBrains. *JetBrains: website*. Available at: <https://www.jetbrains.com/rider/> (accessed 16.12.2023).

13. Avalonia UI. *Avalonia*. Available at: <https://avaloniaui.net/> (accessed 16.12.2023).

14. Model-View-ViewModel. *Microsoft Learn: website*. Available at: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/architecture/maui/mvvm> (accessed 16.12.2023).

15. Just about Modbus RTU with detailed description and examples. *IPC2U: website*. Available at: <https://ipc2u.ru/articles/prostye-resheniya/modbus-rtu/> (accessed 16.12.2023).

16. STM32 32-bit Arm Cortex MCUs. ST: *website*. Available at: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html> (accessed 16.12.2023).

Информация об авторах

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskii@susu.ru.

Волович Георгий Иосифович, д-р техн. наук, проф., директор, ООО «Челэнергоприбор», Челябинск, Россия; g_volovich@mail.ru.

Топольский Дмитрий Валерианович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; topolskiidv@susu.ru.

Топольский Никита Дмитриевич, аспирант кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; topolskiind@susu.ru.

Беляков Александр Евгеньевич, старший преподаватель кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; alex.beliakov@susu.ru.

Information about the authors

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiiov@susu.ru.

Georgiy I. Volovich, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, LLC Chelenergopribor, Chelyabinsk, Russia; g_volovich@mail.ru.

Dmitrii V. Topolskii, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Electronic Computing Machines, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; topolskiidv@susu.ru.

Nikita D. Topolskii, Postgraduate student of the Department of Electronic Computing Machines, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; topolskiind@susu.ru.

Alexander E. Beliakov, Senior Lecturer of the Department of Electronic Computing Machines, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; alex.beliakov@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 17.12.2023

The article was submitted 17.12.2023

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЗАЩИЩЁННОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ С КРИПТОГРАФИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ОБЪЕКТОВ

Л.А. Артюшина, larisa-artusina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5160-5294>
Д.А. Полянский, polyansk@rambler.ru

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Россия

Аннотация. Файловая система является одним из компонентов информационной системы, особенно уязвимых к атакам злоумышленников. Следовательно, повышение уровня защищённости информационной системы невозможно без обеспечения достаточного уровня защиты объектов файловой системы, атаки на которые затрагивают в том числе интересы пользователей информационных систем. Для принятия решений по использованию тех или иных механизмов защиты объектов файловой системы необходима регулярная оценка их текущего уровня защищённости. **Цель исследования:** построение модели оценки защищённости информационной системы с криптографическим преобразованием объектов файловой системы в условиях применения злоумышленником широкого спектра атак на файловую систему. **Материалы и методы.** Анализ научных публикаций по проблеме оценки защищённости информационных систем позволил предложить методику оценки защищённости активов информационной системы. Методика основывается на комбинации вероятностного подхода к анализу возможных сценариев реализации угроз в информационных системах для объектов файловой системы, экспертных оценок базовых событий атаки и представления в виде деревьев атак. Представление реализации угроз в виде деревьев атак использовано для моделирования действий злоумышленника. **Результаты.** Разработана структурная модель информационной системы с криптографическим преобразованием объектов. Выделены её ценные активы. Определён перечень основных угроз информационной безопасности, актуальных для такого рода систем. Смоделированы возможные варианты путей реализации атак и возможные сценарии развития событий в процессах передачи объектов файловой системы с криптографическим преобразованием. Предложен комплекс мер защиты объектов информационной системы с криптографическим преобразованием объектов. Предложен расчёт вероятностей атак на актив по пути, определённому деревом атак, возможности реализации атаки, степени эффективности предлагаемых контрмер. **Заключение.** Представленная методика оценки защищённости информационной системы с криптографическим преобразованием объектов даёт возможность комплексного применения известных подходов, будет полезна разработчикам и исследователям в практической и научной деятельности по обеспечению информационной безопасности.

Ключевые слова: информационная безопасность, оценка защищённости, вероятностный подход, деревья атак

Для цитирования: Артюшина Л.А., Полянский Д.А. Подходы к оценке защищённости информационных систем с криптографическим преобразованием объектов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 1. С. 32–43. DOI: 10.14529/ctcr240103

APPROACHES TO ASSESSING THE SECURITY OF INFORMATION SYSTEMS WITH CRYPTOGRAPHIC TRANSFORMATION OF OBJECTS

L.A. Artyushina, larisa-artusina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5160-5294>

D.A. Polyansky, polyansk@rambler.ru

Vladimir State University named after Alexander and Nicolay Stoletovs, Vladimir, Russia

Abstract. The file system is one of the components of an information system, especially vulnerable to attacks by intruders. Consequently, it is impossible to increase the security level of an information system without ensuring a sufficient level of protection for file system objects, attacks on which affect, among other things, the interests of users of information systems. In order to make decisions on the use of certain mechanisms for protecting file system objects, a regular assessment of their current level of security is necessary. **The purpose of the study.** Building a model for assessing the security of an information system with cryptographic transformation of file system objects in the context of an attacker using a wide range of attacks on the file system. **Materials and methods.** The analysis of scientific publications on the problem of assessing the security of information systems allowed us to propose a methodology for assessing the security of information system assets. The methodology is based on a combination of a probabilistic approach to the analysis of possible scenarios for the implementation of threats in information systems for file system objects, expert assessments of basic attack events and representations in the form of attack trees. The threat implementation representation in the form of attack trees is used to simulate the actions of an attacker. **Results.** A structural model of an information system with cryptographic transformation of objects has been developed. Its valuable assets have been allocated. The list of the main threats to information security relevant for such systems is defined. Possible variants of the ways of implementing attacks and possible scenarios of the development of events in the processes of transferring file system objects with cryptographic transformation are modeled. A set of measures for the protection of information system objects with cryptographic transformation of objects is proposed. The calculation of the probabilities of attacks on an asset along the path determined by the attack tree, the possibility of implementing an attack, the degree of effectiveness of the proposed countermeasures is proposed. **Conclusion.** The presented methodology for assessing the security of an information system with cryptographic transformation of objects makes it possible to use well-known approaches in a comprehensive manner, and will be useful to developers and researchers in practical and scientific activities to ensure information security.

Keywords: security assessment, probabilistic approach, information protection, qualitative approach, attack trees

For citation: Artyushina L.A., Polyansky D.A. Approaches to assessing the security of information systems with cryptographic transformation of objects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(1):32–43. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240103

Введение

Применение информационных технологий в различных сферах деятельности человека, рост числа и масштабов информационных систем (ИС), активные действия злоумышленников, преследующих корыстные или деструктивные цели, поднимают задачу обеспечения уровня защищённости ИС на новый уровень [1–6]. Файловая система (ФС) является одним из компонентов ИС, особенно уязвимых к атакам злоумышленников, следовательно, повышение уровня защищённости ИС невозможно без обеспечения достаточного уровня защиты объектов ФС, атаки на которые затрагивают в том числе интересы пользователей ИС. Для принятия решений по использованию тех или иных механизмов защиты объектов ФС необходима регулярная оценка их текущего уровня защищённости с применением вероятностного подхода и деревьев атак для их моделирования, которые использованы в данной работе.

Введём необходимые рабочие определения и допущения. Вслед за [7] под ИС будем понимать совокупность содержащейся в базах данных информации и обеспечивающих её обработку информационных технологий и технических средств. Исходя из представления о базе данных как ресурсе с распределённым доступом, а также о том, что одним из наиболее эффективных способов обеспечения свойства конфиденциальности информации является её шифрование [8, 9], примем в качестве исследуемого варианта ИС систему с криптографическим преобразованием объектов ФС (ИСКПО). Такая система может быть построена, например, на известном алгоритме *CAST-128* с режимом *CBC*. А для полного сокрытия содержимого исходных данных и повышения криптоустойчивости передаваемой между клиентом и сервером информации в ИСКПО может быть использован алгоритм *AES-128* с повторным шифрованием данных. Принято допущение о том, что при расшифровании папки представляют собой файл.

Цель данной работы состоит в построении модели оценки защищённости ИСКПО в условиях применения злоумышленником широкого спектра атак на ФС.

Модель ИСКПО

Для реализации базовых функций управления доступом ИСКПО предоставляет пользователям возможности регистрации и авторизации под своей учётной записью, шифрования и расшифрования файлов и папок. Структурно ИСКПО можно описать совокупностью двух пакетов классов и объектов.

Пакет «Сервер»:

1) класс *стартовое окно сервера*: *стартовоеОкно* – отображает графический интерфейс; *кнопкаАктивированияСервера* – необходима для перехода к рабочему окну и непосредственной активации сервера;

2) класс *рабочее окно сервера*: *рабочееОкно* – отображает графический интерфейс;

3) класс *сервер*: *активацияСервера* – переводит сервер в рабочее состояние; *взаимодействиеСКлиентом* – необходим для взаимодействия с клиентом;

4) класс *БД*: *проверитьНаличиеПользователя* – проверка наличия пользователя в БД; *проверитьНаличиеФайла* – проверка наличия файла в БД; *проверитьНаличияТаблицыПользователей* – проверка наличия таблицы с пользователями в БД; *проверитьНаличияТаблицыФайлов* – проверка наличия таблицы файлов в БД; *созданиеТаблицыПользователей* – создание таблицы пользователей в БД; *созданиеТаблицыФайлов* – создание таблицы файлов в БД; *добавитьДанныеПользователя* – добавление данных зарегистрированного пользователя в БД; *добавитьДанныеФайла* – добавление данных зашифрованного файла в БД.

Пакет «Клиент»:

1) класс *Криптография*: *шифрованиеБлочное* – инициирует шифрование файла/папки на алгоритме *CAST-128*; *расшифрованиеБлочное* – инициирует расшифрование файла/папки на алгоритме *CAST-128*; *генерацияСтартовыхПараметров* – генерирует ключ и вектор, инициализации, идентификатор; *созданиеХэша* – преобразует входные данные в хэш; *шифрованиеAES* – шифрует данные для их отправления на сервер; *расшифрованиеAES* – расшифровывает данные сервера; *прочитатьИдентификатор* – считывает идентификатор из зашифрованного файла;

2) класс *окно регистрации/авторизации*: *кнопкаРегистрации* – активирует регистрацию на основе информации, введённой пользователем; *кнопкаАвторизации* – осуществляет авторизацию на основе информации, введённой пользователем; *отображениеОкнаВхода* – отображает окно регистрации/авторизации;

3) класс *окно шифрования/расшифрования*: *кнопкаШифрование* – инициирует шифрование; *кнопкаРасшифрование* – инициирует расшифрование; *отображениеОкнаРаботы* – отображает окно шифрования/расшифрования;

4) класс *Архив*: *архивация* – осуществление архивации; *рекурсивнаяАрхивация* – рекурсивная архивация файлов и папок внутри каждой папки в папке; *созданиеФайлаАрхива* – создание непосредственно файла архива;

5) класс *Клиент*: *обменИнформацией* – осуществляет обмен информацией с сервером.

Структура пакетов «Сервер» и «Клиент» представлена на рис. 1 и 2.

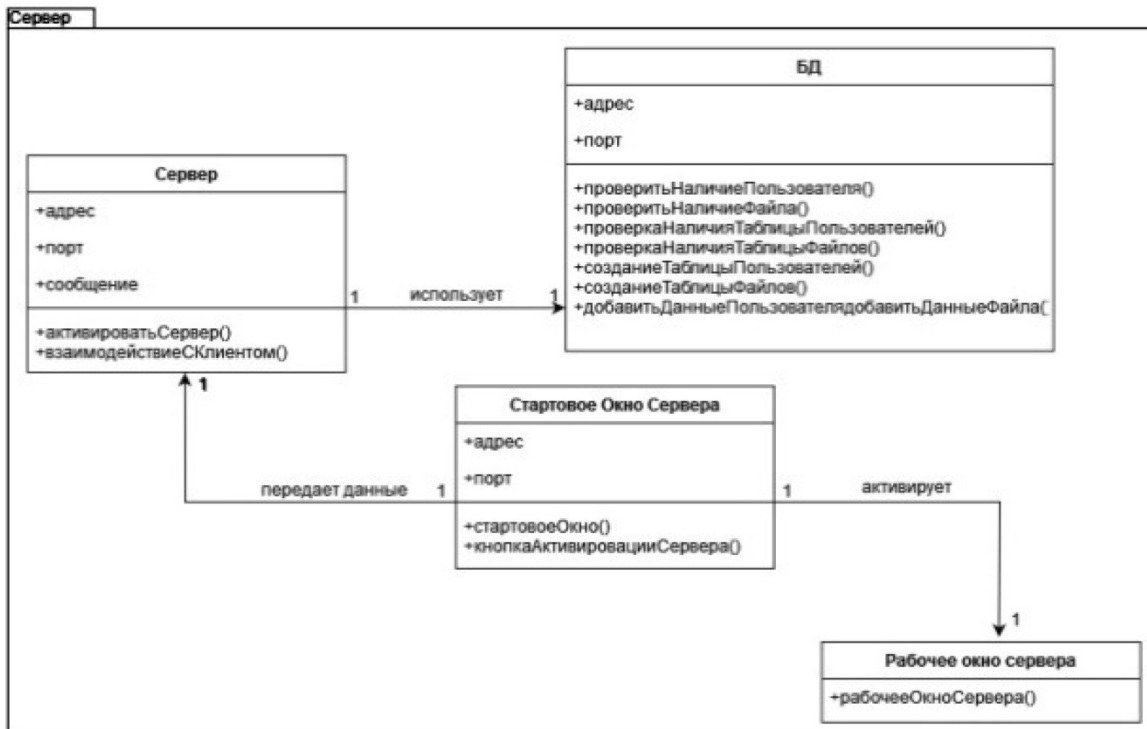


Рис. 1. Пакет «Сервер»
Fig. 1. The “Server” Package

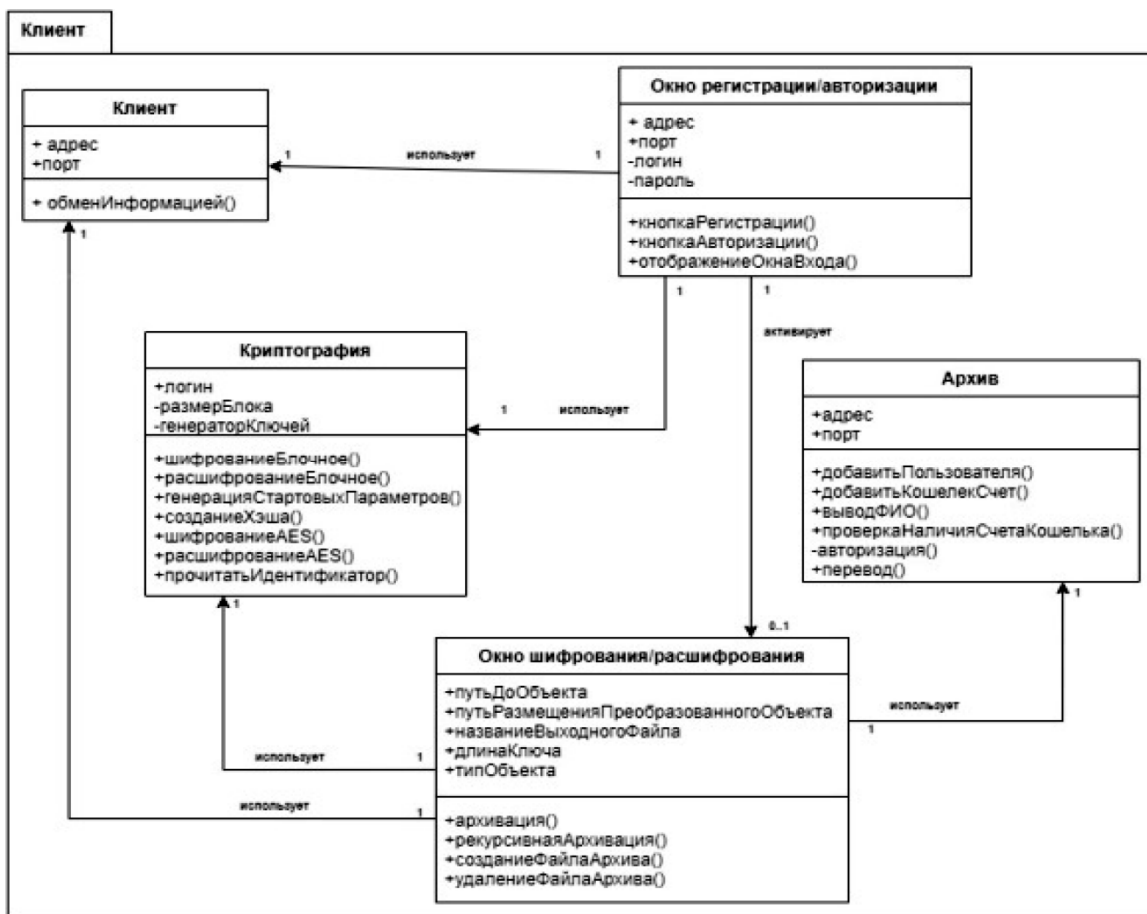


Рис. 2. Пакет «Клиент»
Fig. 2. The “Client” package

При шифровании папок пользователь должен предварительно преобразовать их в архив, который на следующем шаге будет зашифрован и предоставлен пользователю. Используемый в работе алгоритм шифрования относится к блочным шифрам и предполагает обработку данных блоками фиксированной длины. Эта особенность определила структуру базы данных (БД), используемой в ИСКПО:

$$\begin{cases} \text{ИСКПО} = \langle U, FI \rangle; \\ U = \langle \text{Log}_i, \text{Pass}_i \rangle, i = 1..n; \\ FI = \langle ID_j, \text{Vec}_j, \text{Ost}_j, \text{Len}_j, \text{Km}_j, \text{Kr}_j \rangle, j = 1..k, \end{cases} \quad (1)$$

где U – множество пользователей;

FI – множество данных, характеризующих шифрованные файлы.

$$U = \langle \text{Log}_i, \text{Pass}_i \rangle, i = 1..n, \quad (2)$$

где Log_i – логин i -го пользователя;

Pass_i – пароль i -го пользователя;

n – количество пользователей в системе.

$$FI = \langle ID_j, \text{Vec}_j, \text{Ost}_j, \text{Len}_j, \text{Km}_j, \text{Kr}_j \rangle, j = 1..k, \quad (3)$$

где ID_j – идентификатор j -го файла, является хешированной зашифрованной последовательностью первых 64 000 бит данных;

Vec_j – вектор инициализации j -го файла, используется для предотвращения повторного шифрования данных, что усложняет процесс взлома;

Ost_j – остаток в блоке j -го файла, образуется, если последний используемый блок данных не кратен размеру блока, в этом случае последний блок дополняется случайными цифрами предпоследнего байта;

Len_j – длина ключа j -го файла. Алгоритм шифрования *CAST-128* позволяет варьировать длину ключа в диапазоне от 40 до 128 бит, в нашем случае $\text{Len}_j = 128$ как позволяющая реализовать алгоритм на большинстве современных платформ [9];

Km_j, Kr_j – части ключа j -го файла, в алгоритме используются как маскировка ключа и перестановки ключа соответственно;

k – количество данных, характеризующих шифрованные файлы.

Подробно использованный алгоритм шифрования описан в [9].

Разработка перечня угроз информационной безопасности (ИБ) активам ИСКПО

ИСКПО полностью соответствует определению ИС, данному в Федеральном законе N 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» [7], поэтому можно выделить следующие основные активы ИСКПО:

– информационные ресурсы: база данных, трафик ($Y1$);

– аппаратное обеспечение: сервер, оперативная память ($Y2$).

За рамки работы вынесены вопросы защиты сетевого оборудования и программной среды как относящиеся к обязанностям администратора безопасности. Основным моделируемым процессом в ИСКПО является защита файла путём его шифрования. Анализ с использованием БД УБИ ФСТЭК [10] позволяет выявить следующие актуальные угрозы ИСПО, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Угрозы ИСКПО и пути их реализации

Table 1

Threats of lawsuits and ways of their implementation

№	Название угрозы	Код актива	Пути реализации угрозы
1	Угроза длительного удержания вычислительных ресурсов пользователями	Y1	Многочисленные обращения к серверу различных клиентов
2	Угроза неконтролируемого роста числа зарезервированных вычислительных ресурсов	Y1	Постоянное многократное обращение к серверу с одного клиента
3	Угроза избыточного выделения оперативной памяти	Y2	Шифрование файла огромного размера (равного объёму оперативной памяти)
4	Угроза неправомерного ознакомления с защищаемой информацией	Y1	Хищение БД
5	Угроза несанкционированного доступа к аутентификационной информации	Y1, Y2	Чтение информации из БД
6	Угроза несанкционированного копирования защищаемой информации	Y2	Копирование БД
7	Угроза использования слабостей протоколов сетевого/локального обмена данными	Y1	Чтение сетевого трафика
8	Угроза перехвата данных, передаваемых по вычислительной сети	Y1, Y2	Модификация сетевого трафика
9	Угроза ошибочной аутентификации	Y1, Y2	Подбор аутентификационных данных

Оценка возможности атак на ИСКПО

Принятие решений по управлению механизмами ИБ и выбор тех или иных средств защиты основаны на оценке рисков для ИС, которая носит вероятностный характер [11–14]. Оценка вероятности реализации атак на ИСКПО в данной работе основана на ранжировании угроз ИБ в результате анализа функционирования системы на некотором промежутке времени T . Этот период можно охарактеризовать количеством и типом реализованных атак на активы ИС.

Можно выделить основные свойства потока событий типа «атака» для ИСКПО:

– поток стационарен ввиду того, что к ИСКПО применимо требование круглосуточной доступности сервисов, что даёт возможность злоумышленникам осуществить попытку реализации угрозы в любое время;

– практика показывает [5], что на одну ИС направлены различные атаки вне зависимости от результативности более ранних атак, поток обладает свойством отсутствия последствия;

– поток ординарен, поскольку в основе ИСКПО лежит защищаемая локальная сеть организации и вероятность появления более одной атаки за малый промежуток времени пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью появления в системе одного такого события.

Данные свойства позволяют сделать вывод о том, что поток событий типа «атака» для ИСКПО удовлетворяет основным свойствам простейшего потока Пуассона и интенсивность атак подчиняется закону распределения Пуассона [11], и вероятность того, что за время T произойдёт именно k атак определённого типа при среднем числе атак λ на данном интервале времени T , равна

$$p(k) = \frac{\lambda^k}{k!} \cdot e^{-\lambda}. \quad (4)$$

Вслед за [6] введём допущение, разделив инциденты по нескольким категориям, объединив угрозы в группы по способу реализации:

1) эксплуатация уязвимости: угроза длительного удержания вычислительных ресурсов пользователями, угроза избыточного выделения оперативной памяти;

2) угроза неконтролируемого роста числа зарезервированных вычислительных ресурсов, угроза несанкционированного копирования защищаемой информации;

3) компрометация учётной записи: угроза неправомерного ознакомления с защищаемой информацией, угроза несанкционированного доступа к аутентификационной информации; угроза ошибочной аутентификации;

4) сетевые атаки: угроза использования слабостей протоколов сетевого/локального обмена данными, угроза перехвата данных, передаваемых по вычислительной сети, угроза использования слабостей протоколов сетевого/локального обмена данными.

Поскольку функционал моделируемой ИСКПО изначально не предусматривает работу в web (система не использует web-приложения), то web-атаки, равно как и внедрение заражённого ПО и т. п., также вынесены за рамки работы.

В первом приближении для ранжирования угроз по ожидаемой вероятности их реализации (p_i) может быть использована шкала баллов:

$$\begin{cases} 1\text{-й ранг} - \text{высокая вероятность угрозы, } p_i \geq 0,1; \\ 2\text{-й ранг} - \text{средняя вероятность угрозы, } 0,05 \leq p_i < 0,1; \\ 3\text{-й ранг} - \text{низкая вероятность угрозы, } p_i < 0,05. \end{cases}$$

Оценка ожидаемых вероятностей реализации угроз основана на статистическом распределении инцидентов с разным и высоким уровнями критичности [6]:

$$p_c = \frac{p_{d3} + p_{d4} + p_{h3} + p_{h4}}{n}, \quad (5)$$

где p_c – среднее значение вероятности; p_{d3} , p_{d4} – вероятности инцидентов с разным уровнем критичности за III, IV кварталы 2022 года; p_{h3} , p_{h4} – вероятности инцидентов с высоким уровнем критичности за III, IV кварталы 2022 года; n – количество месяцев в III, IV кварталах 2022 года. Результаты расчётов по категориям угроз представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения вероятности реализации угроз (по категориям)

Table 2

Probability values for threats to materialize (by category)

№	Категории угроз	Вероятность реализации угроз	Ранг угроз
1	Эксплуатация уязвимости	0,07	2
2	Компрометация учётной записи	0,04	3
3	Сетевые атаки	0,03	3

Поскольку атака – это реализация угрозы, в качестве базовых событий (вариантов атак) можно принять выделенные выше угрозы.

Подходы и методы оценки вероятностей базовых событий являются задачами дополнительных исследований. В работе для такой оценки была использована комбинированная методика, включающая в себя экспертные оценки и вероятностный подход к анализу рисков безопасности и оценке эффективности систем защиты [14, 15]. Введём следующие параметры и их градации:

1) S – сложность атаки: а) 1 – реализация атаки не требует усилий; б) 2 – атаку просто реализовать; в) 3 – атака сложна в реализации;

2) C – стоимость атаки: а) 1 – атака низкой стоимости; б) 2 – атака средней стоимости; в) 3 – атака высокой стоимости;

3) L – сложность обнаружения атаки: а) 1 – атаку сложно обнаружить; б) 2 – атаку достаточно сложно обнаружить; в) 3 – атаку легко обнаружить;

4) K_1 – возможность возникновения источника события, K_2 – степень готовности источника события, K_3 – ущерб от реализации события: 1–2 – очень низкая(ий), 3–4 – низкая(ий), 5–7 – средняя(ий), 8–9 – высокая(ий), 10 – очень высокая(ий).

В выборе параметров можно руководствоваться соображениями целесообразности проведения атаки. Значениями параметров являются экспертные оценки, выставляемые в ходе проводимых тестов на проникновение, позволяющие выявить проблемы в архитектуре ИСКПО, конфигурации сервера. Пример характеристик базовых событий в соответствии с приведёнными параметрами и их градациями представлен в табл. 3.

Таблица 3

Пример характеристик базовых событий

Table 3

Example of characteristics of basic events

№	Базовые события	S	C	L	K_1	K_2	K_3
1	Длительное удержание вычислительных ресурсов	2	1	3	3	10	5
2	Неконтролируемый рост числа зарезервированных вычислительных ресурсов	2	1	3	3	10	5
3	Избыточное выделение оперативной памяти	2	1	3	1	10	3
4	Неправомерное ознакомление с защищаемой информацией	3	2	2	7	10	7
5	Несанкционированный доступ к аутентификационной информации	3	2	2	7	10	7
6	Угроза несанкционированного копирования защищаемой информации	3	2	1	7	10	7
7	Использование слабостей протоколов сетевого/локального обмена данными	2	1	3	7	10	7
8	Перехват данных, передаваемых по вычислительной сети	1	1	3	7	10	7
9	Ошибочная аутентификация	3	2	3	5	10	4

С учётом значимости входных параметров вероятность базового события равна:

$$p = w_1 \cdot u(S) + w_2 \cdot u(C) + w_3 \cdot u(L), \quad (6)$$

где w_1, w_2, w_3 – нормированные весовые коэффициенты, обозначающие значимость каждого входного параметра для итогового результата, $\sum_1^3 w_i = 1$.

Оценка весовых коэффициентов также является предметом дополнительных исследований. В первом приближении сложность атаки, стоимость атаки и сложность обнаружения атаки можно принять равными в оценке её целесообразности:

$$w_1 = w_2 = w_3 = 1/3,$$

Функция преобразования:

$$u(x) = \frac{c}{x}, \quad (7)$$

где c – коэффициент преобразования.

Для коэффициента преобразования принято следующее допущение: при минимальных оценках всех базовых событий вероятность основного события должна попадать под определение высокой вероятности успешности атаки. В данном случае использовано значение $c = 0,3$. Расчет вероятностей базовых событий представлен ниже. Нумерация вероятностей соответствует табл. 3.

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_7 = \frac{0,3}{3} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{1} + \frac{1}{3} \right) = 0,18;$$

$$p_4 = p_5 = \frac{0,3}{3} \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) = 0,13;$$

$$p_6 = p_7 = \frac{0,3}{3} \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2} + \frac{1}{1} \right) = 0,18;$$

$$p_8 = \frac{0,3}{3} \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right) = 0,18;$$

$$p_9 = \frac{0,3}{3} \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right) = 0,12.$$

Комплекс контрмер

Для нейтрализации угроз ИБ применительно к активам ИСКПО предложен комплекс контрмер, включающий в себя как хорошо известные меры защиты ИС, так и учитывающие особенности моделируемой ИСКПО, представленный в табл. 4.

Контрмеры
Countermeasures

Table 4

№ базового события	Контрмеры
1	Паузы после каждого обращения клиента к серверу в течение 5 секунд. Блокировка функционала клиента (возможности запускать шифрование и расшифрование), во время криптографических преобразований
2	Паузы после каждого обращения клиента к серверу в течение 5 секунд. Блокировка функционала клиента (возможности запускать шифрование и расшифрование) во время криптографических преобразований
3	Шифрование фиксированных блоков данных из файла
4	Данные в БД хранятся в зашифрованном и хешированном виде, в зависимости от таблиц
5	Данные в БД хранятся в зашифрованном и хешированном виде, в зависимости от таблиц
6	Данные в БД хранятся в зашифрованном и хешированном виде, в зависимости от таблиц
7	Передача хешированных (в случае логина и пароля) и зашифрованных сообщений (в случаях иной информации)
8	Передача хешированных (в случае логина и пароля) и зашифрованных сообщений (в случаях иной информации)
9	Паузы после каждого обращения клиента к серверу, 5 секунд после первого обращения и далее по +1 секунда от времени каждого предыдущего обращения

Применение методологии деревьев атак в модели управления ИБ ИСКПО

Деревья атак являются формальным методом моделирования реализации угроз ИБ в отношении ИС. Атаки представляются в виде деревьев, где корень – цель атаки, ближайшие узлы – подцели атаки, листья – способы достижения подцелей и реализации атаки на основную цель. Узлы в дереве могут быть типа «И» и «ИЛИ».

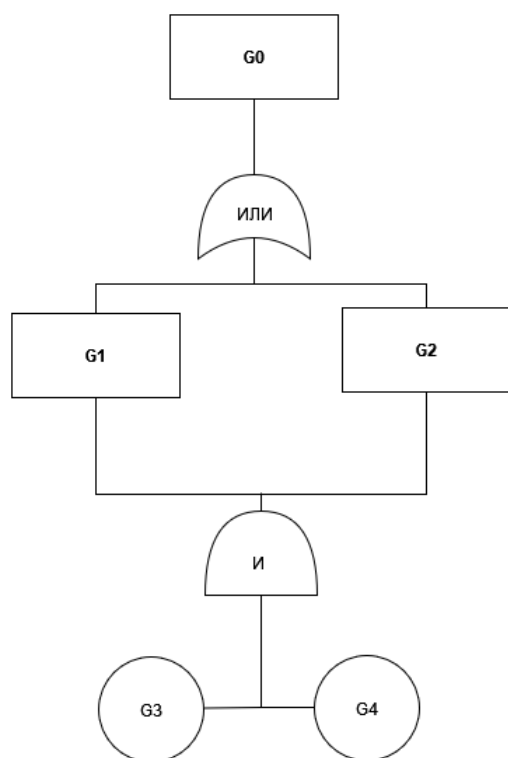


Рис. 3. Дерево атак на сервер
Fig. 3. The Tree of attacks on the server

Для реализации атаки необходимо обойти все дочерние узлы типа «И» или хотя бы один узел типа «ИЛИ». Подробно методология деревьев атак и её применение представлены в работах [1–5]. Рассмотрим использование методологии деревьев атак для моделирования и обнаружения инцидентов ИБ в модели ИСКПО на примере одной угрозы. Для каждой угрозы были определены цель и возможные варианты атаки, основанные на описании угроз и путях их реализации (см. табл. 1, 4).

Угроза 1: цель (G0) – сервер, варианты атаки: G1 – постоянное многократное обращение к серверу с одного клиента, G2 – многократные обращения к серверу различных клиентов.

Контрмеры: G3 – паузы после каждого обращения клиента к серверу в течение 5 секунд, G4 – блокировка функционала клиента (возможности запускать шифрование и расшифрование) во время криптографических преобразований. Дерево атак на сервер представлено на рис. 3.

Оценка эффективности предлагаемого комплекса контрмер

В первом приближении (при условии достоверной и полной оценки вероятностей базовых событий) эффективность мер защиты может быть рассчитана как вероятность состояния системы, при котором отсутствует источник атаки, он не готов к реализации события, а системе не нанесён ущерб от реализации события [14, 15]:

$$\delta_i = 1 - p_i \cdot \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}{10^3}, \quad (8)$$

где δ_i – эффективность i -й контрмеры.

Расчёт эффективности контрмер (в соответствии с нумерацией табл. 4):

$$\delta_1 = \delta_2 = 1 - 0,18 \cdot 0,15 = 0,973;$$

$$\delta_3 = 1 - 0,18 \cdot 0,03 = 0,995;$$

$$\delta_6 = \delta_7 = \delta_8 = 1 - 0,18 \cdot 0,49 = 0,936;$$

$$\delta_9 = 1 - 0,12 \cdot 0,2 = 0,976.$$

Эффективность защиты для всех событий превышает 90 %, что свидетельствует об эффективности разработанного комплекса контрмер.

Заключение

В статье рассмотрена методика оценки защищённости информационной системы с криптографическим преобразованием файловых объектов, позволяющая смоделировать возможные варианты путей реализации атак и возможные сценарии развития событий в процессах передачи объектов файловой системы с криптографическим преобразованием, а также рассчитать вероятности реализации атак на актив по пути, определённому деревом атак, и степень эффективности предлагаемых контрмер. Методика даёт возможность комплексного применения известных подходов к оценке защищённости, будет полезна разработчикам и исследователям при выборе общих мер защиты информационных систем. Оценка возможностей реализации атак и эффективности мер защиты, учитывающая специфические особенности реализации ИСКПО, равно как и более широкого класса ИС, требует дальнейших исследований.

Работа выполнена во Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

Список литературы

1. Алпеев Е.В., Стадник А.Н., Скрыль С.В. Методика прогнозирования компьютерных атак на основе определения весов атрибутов компьютерной атаки с применением метода деревьев решений // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2021. № 6. С. 82–92. ISSN: 2306-1456.
2. Кляус Т.К., Гатчин Ю.А. Определение вероятности реализации атак на информационную систему с помощью деревьев событий // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. 2018. № 4 (30). С. 31–37. DOI: 10.14529/secur180405, ISSN: 2225-5435.
3. Дородников Н.А. Разработка методики повышения уровня защищённости вычислительных сетей на основе вероятностной поведенческой модели, использующей деревья атак: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.19. СПб.: С.-Петербург. нац. исслед. ун-т информат. технологий, механики и оптики, 2017. 185 с.
4. Середкин М.Д., Атомян А.С., Моргунов В.М. Классификация компьютерных атак на основе деревьев решений // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации. 2019. № 28. С. 107–108. ISSN: 2305-994X.
5. Чечулин А.А. Построение и анализ деревьев атак на компьютерные сети с учетом требования оперативности: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.19. СПб.: С.-Петербург. ин-т информатики и автоматизации РАН, 2013. 152 с.
6. Отчет о кибератаках на российские компании в 2022 году // Ростелеком Солар: сайт. URL: <https://rt-solar.ru/analytics/reports/3332/> (дата обращения: 10.04.2023).
7. Российская Федерация. Федеральный закон «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» от 27.07.2006 N 149-ФЗ // КонсультантПлюс: сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61798/ (дата обращения: 10.04.2023).

8. Спиричева Н.Р. Алгоритмы блочной криптографии. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. 78 с.
9. Гатченко Н.А., Исаев А.С., Яковлев А.Д. Криптографическая защита информации. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 142 с.
10. Федеральная служба по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК России): сайт. URL: <http://fstec.ru> (дата обращения: 10.04.2023).
11. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Высш. шк., 2000. 480 с.
12. Солодов А.К. Основы финансового риск-менеджмента. М.: Издание Александра К. Солодова, 2017. 286 с.
13. Linets G.I., Melnikov S.V. Criterion for identification of the probability model of the state of satellite communication channels // Современная наука и инновации. 2020. № 2 (30). С. 29–36.
14. Буй П.М. Оценка рисков кибербезопасности инфокоммуникационных систем // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2020. № 2 (41). С. 20–23.
15. Пашков Н.Н., Дрозд В.Г. Анализ рисков информационной безопасности и оценка эффективности систем защиты информации на предприятии // Современные научные исследования и инновации. 2020. № 1 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/01/90380> (дата обращения: 10.04.2023).

References

1. Alpeyev E.V., Stadnik A.N., Skryl S.V. A method of predicting computer attacks based on determining the weights of attributes of a computer attack using the decision tree method. Electronic network polythematic journal “Scientific Works of the Kuban State Technological University”. 2021;6:82–92. (In Russ.) ISSN: 2306-1456.
2. Klyaus T.K., Gatchin Yu.A. Probability evaluation of attacks on information system using event tree analysis. Journal of the Ural Federal district. Information security. 2018;4(30):31–37. (In Russ.) DOI: 10.14529/secur180405, ISSN: 2225-5435.
3. Dorodnikov N.A. *Razrabotka metodiki povysheniya urovnya zashchishchennosti vychislitel'nykh setey na osnove veroyatnostnoy povedencheskoy modeli, ispol'zuyushchey derev'ya atak: dis. kand. tekhn. nauk: 05.13.19* [Development of a technique for increasing the level of security of computer networks based on a probabilistic behavioral model using attack trees. Cand. sci. diss.]. St. Petersburg: St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; 2017. 185 p. (In Russ.)
4. Seredkin M.D., Atomyan A.S., Morgunov V.M. [Classification of computer attacks based on decision trees]. *Metody i tekhnicheskiye sredstva obespecheniya bezopasnosti informatsii*. 2019;28:107–108. (In Russ.) ISSN: 2305-994X.
5. Chechulin A.A. *Postroyeniye i analiz derev'yev atak na komp'yuternyye seti s uchetom trebovaniya operativnosti: dis. kand. tekhn. nauk: 05.13.19* [Construction and analysis of attack trees on computer networks, taking into account the requirements of efficiency. Cand. sci. diss.]. St. Petersburg: St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences; 2013. 152 p. (In Russ.)
6. *Otchet o kiberatakakh na rossiyskie kompanii v 2022 godu* [Report on cyber attacks on Russian companies in 2022]. *Rostelekom Solar: website*. (In Russ.) Available at: <https://rt-solar.ru/analytics/reports/3332/> (accessed 10.04.2023).
7. *Rossiyskaya Federatsiya. Federal'nyy zakon “Ob informatsii, informatsionnykh tekhnologiyakh i o zashchite informatsii” ot 27.07.2006 N 149-FZ* [Russian Federation. Federal Law “On Information, Information Technologies and Information Protection” dated July 27, 2006 N 149-FZ]. *Konsul'tantPlyus: website*. (In Russ.) Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61798/ (accessed 10.04.2023).
8. Spiricheva N.R. *Algoritmy blochnoy kriptografii* [Block cryptography algorithms]. Ekaterinburg: Ural University Publ; 2013. 78 p. (In Russ.)
9. Gatchenko N.A., Isaev A.S., Yakovlev A.D. *Kriptograficheskaya zashchita informatsii* [Cryptographic protection of information]. St. Petersburg: ITMO University; 2012. 142 p. (In Russ.)

10. *Federal'naya sluzhba po tekhnicheskomu i eksportnomu kontrolyu (FSEK Rossii): sayt* [Federal Service for Technical and Export Control (FSTEC of Russia): website]. (In Russ.) Available at: <http://fstec.ru> (accessed 10.04.2023).

11. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostey i ee inzhenernye prilozheniya* [Probability theory and its engineering applications]. Moscow: Vysshaya shkola; 2000. 480 p. (In Russ.)

12. Solodov A.K. *Osnovy finansovogo risk-menedzhmenta* [Fundamentals of financial risk management]. Moscow: Edition of Alexander K. Solodov; 2017. 286 p. (In Russ.)

13. Linets G.I., Melnikov S.V. Sriterion for identification of the probability model of the state of satellite communication channels. *Modern Science and Innovations*. 2020;2(30):29–36.

14. Bui P.M. Assessment of the cybersecurity risks infocommunication's systems of railway transport. *Bulletin of the Belarusian State University of Transport: science and transport*. 2020;2(41):20–23. (In Russ.)

15. Pashkov N.N., Drozd V.G. [Analysis of information security risks and assessment of the effectiveness of information security systems at the enterprise]. *Modern scientific researches and innovations*. 2020;1. (In Russ.) Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2020/01/90380> (accessed 10.04.2023).

Информация об авторах

Артюшина Лариса Андреевна, канд. пед. наук, магистр направления «Информационные системы и технологии», доц. кафедры информатики и защиты информации, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Россия; larisa-artusina@yandex.ru.

Полянский Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доц. кафедры информатики и защиты информации, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Россия; polyansk@rambler.ru.

Information about the authors

Larisa A. Artyushina, Cand. Sci. (Education), Master's degree in Information Systems and Technologies, Ass. Prof. of the Department of Informatics and Information Protection, Vladimir State University named after Alexander and Nicolay Stoletovs, Vladimir, Russia; larisa-artusina@yandex.ru.

Dmitry A. Polyansky, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Informatics and Information Protection, Vladimir State University named after Alexander and Nicolay Stoletovs, Vladimir, Russia; polyansk@rambler.ru.

Статья поступила в редакцию 12.10.2023

The article was submitted 12.10.2023

Управление в технических системах Control in technical systems

Научная статья
УДК 65:519.71
DOI: 10.14529/ctcr240104

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДИКТИВНЫХ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Г.Ф. Ахмедьянова, ahmedyanova@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3284-7794>

А.М. Пищухин, pishchukhin55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4655-6824>

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Аннотация. Организационно-технические системы являются самым распространенным инструментом решения народнохозяйственных задач. Однако в силу включенного в их состав персонала они характеризуются стохастическим поведением, что актуализирует вопрос разработки их вероятностной модели. С другой стороны, вероятностный аппарат является инструментом прогнозирования грядущих явлений и ситуаций и поэтому необходим механизм его использования в предиктивном (прогнозном) управлении. В работе использовано для этого первое вероятностное приближение в виде марковского процесса и его описания уравнением Фоккера – Планка – Колмогорова. **Цель исследования** заключается в постановке и решении задач оптимального управления с вероятностными критериями качества управления для следящей схемы предиктивного управления, а также в разработке механизма метасистемного переключения моделей в случае адаптивной схемы с прогнозной моделью в контуре управления. **Материалы и методы.** На основе анализа научных идей и методологических подходов в предиктивном управлении отечественных и зарубежных авторов, а также математических методов и моделей осуществлен выбор двух схем реализации предиктивного управления для повышения эффективности функционирования организационно-технических систем: схем следящего и адаптивного управления. **Результаты.** Задача оптимального управления решена с помощью двух методов: принципа максимума Понтрягина и принципа динамического программирования Беллмана. Показано, что в первом случае имеет место выпуклая вверх стратегия достижения целевого значения управляемой величины при максимизирующем подходе, а во втором случае результатом стала стратегия, выпуклая вниз, используемая для оптимального расхода управленческих ресурсов. Кроме того, для другой схемы предиктивного управления – адаптивной с прогнозной моделью в контуре – доказана эффективность применения стратегии метасистемного переключения моделей с постановкой и решением шести метасистемных задач. **Заключение.** Предлагаемый подход может быть использован при проектировании систем управления в организационно-технических системах и выборе стратегий поведения в сложных рыночных условиях при решении проблем их развития.

Ключевые слова: предиктивное управление, следящая система, адаптивная система, оптимальное управление, моделирование, метасистемное переключение

Для цитирования: Ахмедьянова Г.Ф., Пищухин А.М. Исследование предиктивных схем управления функционированием организационно-технических систем // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 1. С. 44–51. DOI: 10.14529/ctcr240104

RESEARCH OF PREDICTIVE SCHEMES FOR MANAGEMENT OF THE FUNCTIONING OF ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS

G.F. Akhmedyanova, ahmedyanova@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3284-7794>

A.M. Pishchukhin, pishchukhin55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4655-6824>

Orenburg State University, Orenburg, Russia

Abstract. Organizational and technical systems are the most common tool for solving national economic problems. However, due to the personnel included in them, they are characterized by stochastic behavior, which raises the issue of developing their probabilistic model. On the other hand, the probabilistic apparatus is a tool for forecasting future phenomena and situations and therefore a mechanism for its use in predictive (forecast) management is needed. For this purpose, the work uses the first probabilistic approximation in the form of a Markov process and its description by the Fokker–Planck–Kolmogorov equation. The purpose of the study is to formulate and solve optimal control problems with probabilistic control quality criteria for a tracking predictive control scheme, as well as to develop a mechanism for metasystem switching of models in the case of an adaptive scheme with a predictive model in the control loop. Materials and methods. Based on the analysis of scientific ideas and methodological approaches in predictive management of domestic and foreign authors, as well as mathematical methods and models, two schemes for implementing predictive management were selected to improve the efficiency of the functioning of organizational and technical systems: tracking schemes and adaptive management. Results. The optimal control problem was solved using two methods: Pontryagin's maximum principle and Bellman's principle of dynamic programming. It is shown that in the first case there is a convex upward strategy for achieving the target value of the controlled value with a maximizing approach, and in the second case the result is a convex downward strategy used for the optimal consumption of management resources. In addition, for another predictive control scheme – adaptive with a predictive model in the loop, the effectiveness of using the strategy of metasystem switching of models with the formulation and solution of six metasystem problems has been proven. Conclusion. The proposed approach can be used when designing management systems in organizational and technical systems and choosing behavior strategies in difficult market conditions when solving problems of their development.

Keywords: predictive control, tracking system, adaptive system, optimal control, modeling, metasystem switching

For citation: Akhmedyanova G.F., Pishchukhin A.M. Research of predictive schemes for management of the functioning of organizational and technical systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(1):44–51. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240104

Введение

Организационно-техническая система в силу включенного в ее состав персонала характеризуется стохастическим поведением [1]. Это делает актуальным вопрос разработки вероятностной модели ее поведения. С другой стороны, вероятностный аппарат является инструментом прогнозирования грядущих явлений и ситуаций и поэтому необходим механизм его использования в предиктивном (прогнозном) управлении. Воспользуемся для этого аппаратом первого вероятностного приближения в виде марковского процесса и его описания уравнением Фоккера – Планка – Колмогорова (ФПК).

1. Описание подхода

При проектировании можно использовать две схемы предиктивного управления: следящую [2] или адаптивную с прогностической моделью в контуре [3–5]. Исследуем в порядке перечисления возможность этих схем.

Пусть вероятность востребованности результата функционирования организационно-технической системы в обществе, например, в виде экспериментального результата работы научной

установки с обслуживающими ее людьми (или произведенной производственным предприятием продукции на рынке) имеет марковскую природу и меняется во времени t , а также зависит от некоторой переменной x , характеризующей степень этой востребованности (например, количество потенциальных покупателей продукции).

Применим к плотности, описанной выше вероятности ω_0^* , уравнение Фоккера – Планка – Колмогорова [6]:

$$\frac{\partial \omega_0^*}{\partial t} = -a_0 \frac{\partial \omega_0^*}{\partial x} + \frac{b_0}{2} \frac{\partial^2 \omega_0^*}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где a_0 – коэффициент сноса; b_0 – коэффициент диффузии.

Уравнение (1) является параболическим [7], и оно подстановками

$$\omega_0^* = e^{\mu x + \lambda t} \cdot \omega_1^*(x, t), \mu = a_0/b_0, \lambda = -a_0^2/2b_0 \quad (2)$$

может быть приведено к каноническому виду

$$\frac{\partial \omega_1^*}{\partial t} = b_1 \frac{\partial^2 \omega_1^*}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Заметим теперь, что дальше мы будем иметь дело с преобразованной вероятностью, описываемой этим уравнением.

С другой стороны, пусть готовность самой организационно-технической системы к функционированию и производству востребованного результата также является случайным процессом, хотя в определенной степени и управляемым. Принимая опять гипотезу марковости этого процесса и учитывая, что это другой процесс и поэтому коэффициенты переноса a и диффузии b также будут другими, получаем второе уравнение ФПК. Поведение плотности вероятности готовности системы ω описывается уравнением

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = b_2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}. \quad (4)$$

Из этого уравнения следует, что управлять процессом повышения готовности организационно-технической системы можно, только изменяя коэффициент b_2 , добиваясь его близости к b_1 (цель управления – $b_2 \rightarrow b_1$). Тогда уравнение (4) преобразуется следующим образом:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = by \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}. \quad (5)$$

Здесь управляющее воздействие носит в большой степени организационный характер, поскольку управлять вероятностью можно, только создавая благоприятные условия для появления желаемого события и устраняя причины его неоявления.

Задача оптимального управления организационно-технической системой [8] в этом представлении должна сводиться к обеспечению такого уровня ее готовности, который приводит к минимуму различия плотностей вероятностей, подчиняющихся уравнениям (3) и (5).

2. Решение с помощью принципа максимума Понтрягина

Для решения поставленной задачи оптимального управления применим прием, подобный идее профессора А.М. Летова [9]. В соответствии с ней в функционал включим вероятностный критерий качества управления в виде суммы квадрата потерь от недостаточности управления, описываемых разностью плотностей вероятностей, введенных выше, и квадрата затрат на управление, снижающее эти потери [10, 11]:

$$F = \int_0^{t_f} \int_0^\infty (q(\omega_1^* - \omega)^2 + (b_1 - yb)^2) dx dt \rightarrow \min, \quad (6)$$

где q – постоянный коэффициент; t_f – время окончания управления.

Составим лагранжиан, в который входит как подынтегральная функция из (6), так и уравнение состояния объекта управления – готовность (5) с использованием одного коэффициента Лагранжа ψ :

$$L = q(\omega_1^* - \omega)^2 + (b_1 - yb)^2 + \psi \left(by \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - \frac{\partial \omega}{\partial t} \right) \rightarrow \min. \quad (7)$$

Применим сначала принцип максимума Понтрягина, для чего составим гамильтониан, требующий максимизации:

$$H = q(\omega_1^* - \omega)^2 + (b_1 - yb)^2 + \psi by \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \rightarrow \max. \quad (8)$$

Используя одно из сопряженных уравнений, получаем

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = 2q(\omega_1^* - \omega). \quad (9)$$

Исключаем теперь множитель Лагранжа:

$$H = q(\omega_1^* - \omega)^2 + (b_1 - yb)^2 + 2qby \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} (\omega_1^* t - P), \quad (10)$$

где $P = \int_0^{t_f} \omega dt$. Определяем управляющее воздействие, при котором имеет место максимум гамильтониана:

$$\frac{\partial H}{\partial y} = -2b(b_1 - y^*b) + 2qb \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} (\omega_1^* t - P) = 0. \quad (11)$$

В итоге

$$y^* = \frac{b_1}{b} - \frac{q}{b} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} (\omega_1^* t - P). \quad (12)$$

Подставляя найденное решение в (5), имеем

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = b \left(\frac{b_1}{b} - \frac{q}{b} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} (\omega_1^* t - P) \right) \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \quad (13)$$

или

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = b_1 \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - q \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right)^2 (\omega_1^* t - P). \quad (14)$$

Не определяя решения, попытаемся ответить на вопрос о его характере, для чего продифференцируем уравнение (14) еще раз по времени:

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = q(\omega - \omega_1^*) \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right)^2. \quad (15)$$

Поскольку ω_1^* – целевая плотность вероятности, определяемая на горизонте планирования предиктивной системы управления, она выше, чем текущая плотность вероятности, в результате ее вторая производная отрицательна, что говорит о выпуклом вверх характере полученной кривой поведения этой величины (при этом множитель (2) не может изменить этого характера). На рис. 1 ход процесса управления с использованием принципа максимума Понтрягина отражается верхней кривой 1, такая стратегия является аналогом лисьей погони [12].

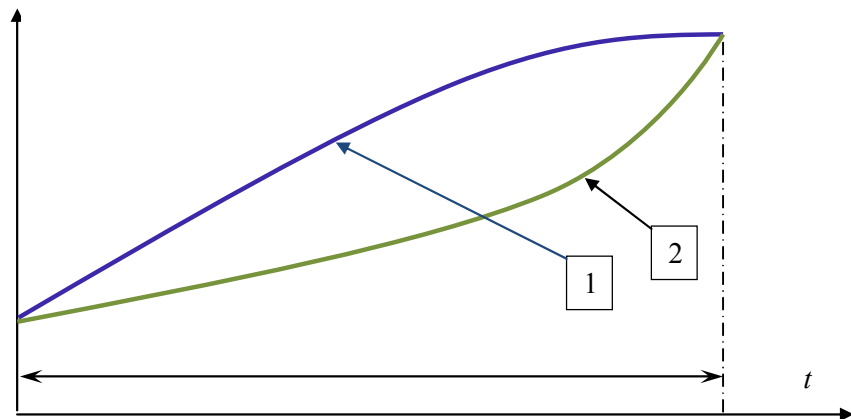


Рис. 1. Траектории достижения целевого значения управляемой величины в следящей системе управления
Fig. 1. Trajectories of achieving the target value of the controlled quantity in the servo control system

3. Решение с помощью принципа динамического программирования Беллмана

Принцип максимума Понтрягина, как известно, дает решение максимального быстродействия и мало экономит управленческие затраты. Их реальная минимизация может быть получена решением задачи оптимального управления по принципу динамического программирования Беллмана. Составляем уравнение Беллмана с использованием функционала (6):

$$q(\omega_1^* - \omega)^2 + (b_1 - yb)^2 + \frac{\partial S}{\partial \omega} by \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0, \quad (16)$$

где S – функция Беллмана. Дифференцируя это уравнение по управляющему воздействию y , получаем

$$-2b(b_1 - yb) + b \frac{\partial S}{\partial \omega} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0 \quad (17)$$

или

$$y = \frac{b_1}{b} - \frac{1}{2b} \frac{\partial S}{\partial \omega} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}. \quad (18)$$

Подставляем полученное решение в (16):

$$q(\omega_1^* - \omega)^2 + \frac{3b_1}{2} \frac{\partial S}{\partial \omega} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial S}{\partial \omega} \right)^2 \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right)^2 = 0. \quad (19)$$

Как видим, получено нелинейное уравнение. Однако для цели данного исследования можно не решать его. Подставим решение (18) в уравнение (5):

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = b_1 \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - \frac{1}{2} \frac{\partial S}{\partial \omega} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right)^2. \quad (20)$$

Примем функцию Беллмана квадратичной с постоянными коэффициентами a_1 a_2 :

$$S = a_1 \omega^2 + a_2 \omega; \quad \frac{\partial S}{\partial \omega} = 2a_1 \omega + a_2 \quad (21)$$

и подставим в (20). Для определения поведения плотности вероятности во времени дифференцируем полученное уравнение по времени:

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} + a_1 \frac{\partial \omega}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right)^2 = 0. \quad (22)$$

Решение этого уравнения находим в справочнике [13]:

$$\omega = C_1 + C_2 \exp \left(-a_1 \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right)^2 t \right). \quad (23)$$

Здесь C_1 и C_2 – константы интегрирования.

Повторяя рассуждения о том, что целевая плотность вероятности больше, чем в начале управления, выбираем восходящую экспоненту в (21) и, следовательно, отрицательное значение коэффициента $a_1 < 0$. Теперь становится очевидным, что полученная кривая достижения целевого значения является выпуклой вниз (нижняя кривая 2 на рис. 1). Такую стратегию необходимо использовать для оптимального достижения результатов [14–16].

4. Адаптивная система с прогнозной моделью в контуре

Пусть теперь объект управления настолько сложный, что его поведение на разных участках описывается разными моделями [17–20]. В этом случае можно применить теоретическое описание с использованием метасистемного подхода [21]. На рис. 2 представлен метасистемный механизм переключения моделей при изменении ситуации. Ветвь управления, содержащая модель, и прямая ветвь с объектом управления включены параллельно так, что на объект и на выбранную модель (находящуюся в области моделирования) действуют одинаковые управляющие U - и возмущающие F -воздействия. Блок принятия решений анализирует управленческую ситуацию по разностному и возмущающему сигналам и принимает решение о дальнейшем управлении в отношении либо коррекции, либо даже смены модели объекта управления на более адекватную ситуации. При этом разностный сигнал образуется вычитанием из модельного Y_M управляемой величины Y .

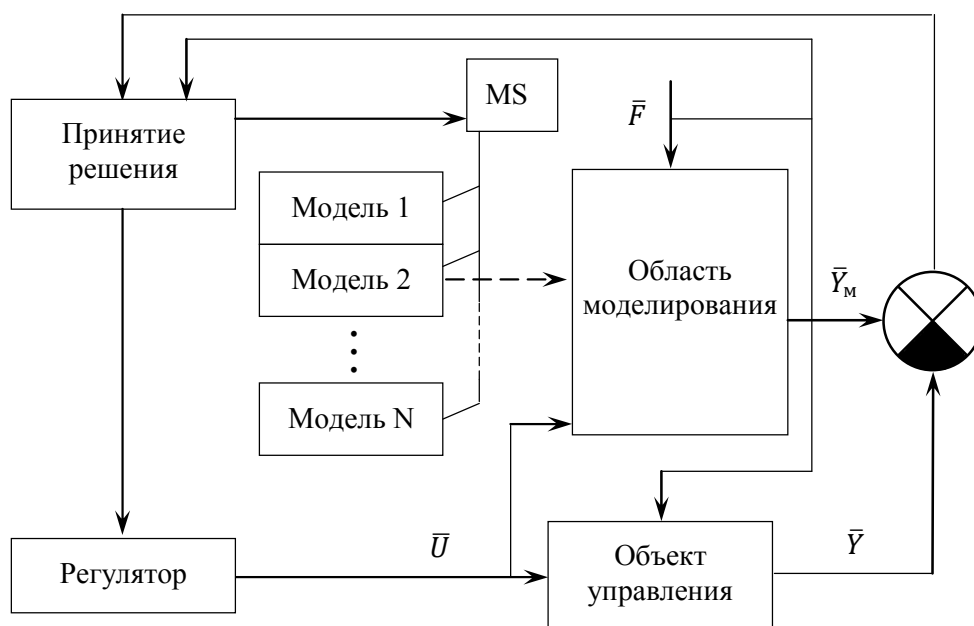


Рис. 2. Механизм переключения моделей в системе управления с прогнозной моделью
Fig. 2. Model switching mechanism in a control system with a predictive model

Самый простой механизм переключения модели будет в случае, когда объект сам является метасистемой. Примером может быть функционирование поликлиники. Если пришел пациент с больным ухом, объектом управления становится кабинет отоларинголога с соответствующим оборудованием и врачом соответствующей квалификации, а в область моделирования выдвигается модель процесса лечения уха. Если же затем подошел пациент с больным глазом, то меняется как кабинет, так и модель процесса лечения.

В случае же, когда объект управления представляется составной моделью, переключение с одной модели на другую будет происходить по результатам сравнения разностного сигнала для разных моделей при одинаковых управляющих и возмущающих воздействиях. При этом выбор будет сделан в пользу модели, в которой разностный сигнал меньше.

Заключение

Таким образом, исследование предиктивных схем управления функционированием организационно-технических систем доказывает их результативность и выявляет схемные решения, при которых она будет наивысшей. Так, в случае большой неопределенности поведения объекта управления и влияющих факторов необходимо использовать следящую схему управления, выбирая максимизирующую стратегию с выпуклой вверх траекторией или оптимальную с траекторией, выпуклой вниз. В случае большей детерминированности можно использовать адаптивную схему с прогнозной моделью и стратегией ее метасистемного переключения.

Список литературы

1. Ахмедьянова Г.Ф., Пищухин А.М. Основы многоуровневого управления в организационно-технических системах: монография. Оренбург: ОГУ. 2020. 162 с. ISBN 978-5-7410-2488-1.
2. Теория автоматического управления / под ред. академика А.А. Воронова. Ч. 1: Теория линейных систем автоматического управления. М.: Высшая школа, 1986. 367 с.
3. Манусов В.З., Орлов Д.В., Антоненков Д.В. Предиктивное управление и прогнозирование производственного процесса в условиях детерминированного хаоса // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2022. № 3. С. 63–78. DOI: 10.31857/S0002331022030049
4. Черешко А.А., Шундерюк М.М. Границы применимости алгоритмов усовершенствованного управления с прогнозирующей моделью в условиях неопределенности объекта управления // Проблемы управления. 2020. № 1. С. 17–23. DOI: 10.25728/ru.2020.1.2
5. Qin S.J., Badgwell T.A. A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology // Control Engineering Practice. 2003. Vol. 11, no. 7. P.733–764. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00186-7
6. Волков И.К., Зуев С.М., Цветкова Г.М. Случайные процессы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 448 с.
7. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. 736 с.
8. Pishchukhin A.M., Akhmedyanova G.F. Algorithms for synthesizing management solutions based on OLAP-technologies // Journal of Physics: Conference Series. International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 – Enterprise Information Systems. 2018. Vol. 1015 (4). P. 042001. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/4/042001
9. Летов А.М. Аналитическое конструирование регуляторов. I–IV // Автоматика и телемеханика. 1960. № 4. С. 436–441; № 5. С. 561–568; № 6. С. 661–665; 1961. № 4. С. 425–435.
10. Пищухин А.М. Вероятностная модель согласования производственного процесса с региональным рынком // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2019. № 1 (61). С. 20–33.
11. Ахмедьянова Г.Ф., Пищухин А.М. Оптимальное управление производственной системой на основе вероятностного критерия // Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 5 (110). С. 7–19. DOI: 10.23859/1994-0637-2022-5-110-1
12. Пищухин, А.М. Управление предприятием на основе прогноза в ассортиментном пространстве // Экономика региона. 2017. Т. 13. № 1. С. 216–225. DOI: 10.17059/2017-1-20
13. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям: пер. с нем. М.: Наука, 1976. 576 с.
14. Ильина Е.А. Моделирование стратегии устойчивого развития промышленных предприятий // Организатор производства. 2021. Т. 29, № 3. С. 130–138. DOI: 10.36622/VSTU.2021.39.13.014

15. Зайченко И.М., Яковлева М.А. Предиктивная аналитика в управлении цепями поставок // Научный вестник Южного института менеджмента. 2019. № 2. С. 18–22. DOI: 10.31775/2305-3100-2019-2-18-22
16. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др. М.: Инфра-М, 2018. 410 с.
17. Lorenzen M., Allgöwer F., Cannon M. Adaptive Model Predictive Control with Robust Constraint Satisfaction // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50, iss. 1. P. 3313–3318. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.512
18. Даринцев О.В., Мигранов А.Б. Предиктивное управление в техпроцессах при ИПД // ITIDS+RRS'2014. 2014. С. 251–256.
19. Alanqar A., Durand H., Christofides P.D. Fault-Tolerant Economic Model Predictive Control Using Empirical Models // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50, iss. 1. P. 3517–3523. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.940
20. Capaci R.B., Vaccari M., Pannocchia G. Model predictive control design for multivariable processes in the presence of valve stiction // Journal of Process Control. 2018. Vol. 71. P. 25–34. DOI: 10.1016/j.jprocont.2018.09.006
21. Ахмедьянова Г.Ф., Пищухин А.М. Гибридная интеллектуализация системы управления авиационным производством // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2021. № 1. С. 146–150.

References

1. Akhmed'yanova G.F., Pishchukhin A.M. *Osnovy mnogourovnevnogo upravleniya v organizatsionno-tekhnicheskikh sistemakh: monografiya* [Fundamentals of multi-level management in organizational and technical systems: monograph]. Orenburg: Orenburg State University; 2020. 162 p. (In Russ.) ISBN 978-5-7410-2488-1.
2. Voronov A.A. (Ed.). *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Ch. 1: Teoriya lineynykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control. Part 1: Theory of linear automatic control systems]. Moscow: Vysshaya shkola; 1986. 367 p. (In Russ.)
3. Manusov V.Z., Orlov D.V., Antonenkov D.V. Predictive control and production process forecasting under deterministic chaos. *Proceedings of the Russian academy of sciences. Power engineering*. 2022;3:63–78. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0002331022030049
4. Cheresenko A.A., Shunderiyuk M.M. Applicability limits of model-based predictive control algorithms under uncertain control object dynamics. *Control Sciences*. 2020;1:17–23. (In Russ.) DOI: 10.25728/pu.2020.1.2
5. Qin S.J., Badgwell T.A. A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology. *Control Engineering Practice*. 2003;11(7):733–764. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00186-7
6. Volkov I.K., Zuev S.M., Tsvetkova G.M. *Sluchaynye protsessy* [Random processes]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ.; 2006. 448 p. (In Russ.)
7. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. *Uraveniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow: Nauka; 1977. 736 p. (In Russ.)
8. Pishchukhin A.M., Akhmedyanova G.F. Algorithms for synthesizing management solutions based on OLAP-technologies. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 – Enterprise Information Systems*. 2018;1015(4):042001. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/4/042001
9. Letov A.M. [Analytical design of regulators. I–IV]. *Automation and telemekhanics*. 1960;4:436–441. 1960;5:561–568; 1960;6:661–665; 1961;4:425–435. (In Russ.)
10. Pishchukhin A.M. Probabilistic model of harmonization of the production process with the regional market. *Vestnik of Samara state technical university. Technical sciences series*. 2019;1(61):20–33. (In Russ.)
11. Akhmedyanova G.F., Pishchukhin A.M. Optimal control of the production system based on a probabilistic criterion. *Cherepovets State University Bulletin*. 2022;5(110):7–19. (In Russ.) DOI: 10.23859/1994-0637-2022-5-110-1
12. Pishchukhin A.M. Company management based on the forecast in product area. *Ekonomika regiona = Economy of region*. 2017;13(1):216–225. (In Russ.) DOI: 10.17059/2017-1-20

13. Kamke E. *Handbook of Ordinary Differential Equations*. Translation from German. Moscow: Nauka Publ.; 1976. 576 p. (In Russ.)
14. Ilyina E.A. Modeling the strategy of sustainable development of industrial enterprises. *Organizer of production*. 2021;29(3):130–138. (In Russ.) DOI: 10.36622/VSTU.2021.39.13.014
15. Zaychenko I.M., Iakovleva M.A. Predictive analytics in supply chain management. *Scientific Bulletin of the Southern Institute of Management*. 2019;2:18–22. (In Russ.) DOI: 10.31775/2305-3100-2019-2-18-22
16. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N. et al. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy* [Management of industrial enterprises: strategies, mechanisms, systems]. Moscow: Infra-M; 2018. 410 p. (In Russ.)
17. Lorenzen M., Allgöwer F., Cannon M. Adaptive Model Predictive Control with Robust Constraint Satisfaction. *IFAC-PapersOnLine*. 2017;50(1):3313–3318. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.512
18. Darintsev O.V., Migranov A.B. [Predictive control in technical processes with IPD]. In: *ITIDS+RRS'2014*. 2014. P. 251–256. (In Russ.)
19. Alanqar A., Durand H., Christofides P.D. Fault-Tolerant Eco-nomic Model Predictive Control Using Empirical Models. *IFAC-PapersOnLine*. 2017;50(1):3517–3523. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.940
20. Capaci R.B., Vaccari M., Pannocchia G. Model predictive control design for multivariable processes in the presence of valve stiction. *Journal of Process Control*. 2018;71:25–34. DOI: 10.1016/j.jprocont.2018.09.006
21. Akhmed'yanova G.F., Pishchukhin A.M. Hybrid intellectualization of the management system in aircraft manufacture. *Russian Aeronautics*. 2021;64(1): 157–162. DOI: 10.3103/S1068799821010220

Информация об авторах

Ахмедьянова Гульнара Фазульевна, канд. пед. наук, доц., доц. кафедры управления и информатики в технических системах, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия; ahmedyanova@bk.ru.

Пищухин Александр Михайлович, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры управления и информатики в технических системах. Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия; pishchukhin55@mail.ru.

Information about the authors

Gulnara F. Akhmedyanova, Cand. Sci. (Education), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Management and Informatics in Technical Systems of the, Orenburg State University, Orenburg, Russia; ahmedyanova@bk.ru.

Alexander M. Pishchukhin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. Doctor of Technical Sciences. Professor of the Department of Control and Informatics in Technical Systems of the, Orenburg State University, Orenburg, Russia; pishchukhin55@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.11.2023

The article was submitted 06.11.2023

АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ В НАТУРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПРИ ИМИТАЦИИ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

С.А. Баркалов, sbarkalov@vgasu.vrn.ru

Е.А. Серебрякова, sea-parish@mail.ru

К.А. Нижегородов, upr_stroy_kaf@vgasu.vrn.ru

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. В данной работе рассматривается информационная система – ее структура и факторы воздействия внешней среды, что позволяет описывать ее имитационными средствами. Элементами для описания подобных систем являются алгебраические дифференциальные уравнения, цепи Маркова или аналогичные им. **Цель исследования** заключается в формировании условий проведения натурального эксперимента не на исследуемой системе, а на некоторой другой (с известными параметрами распределения исследуемой случайной величины, например, закона распределения), достаточно «похожей» на данную и такой, экспериментальное функционирование которой не приведет к сколько-нибудь ощутимым издержкам. **Методы исследования.** При имитации процессов Маркова очень часто встречаются трудности, связанные с необходимостью ввода в память машины стохастических матриц бесконечной размерности. Фактически очень трудно представить бесконечную стохастическую матрицу, в которой все элементы выбраны «чисто случайно», т. е. без каких бы то ни было закономерностей. На практике всегда случаются только такие матрицы, в которых, начиная с некоторой строки, проявляется определенная закономерность в образовании элементов. На этом свойстве основывается решение указанной проблемы. **Результаты.** Алгоритм нахождения случайной величины заключается в выборе того из высказываний, которое при данном значении является истинным. Затем следующая реализация находится по формуле, соответствующей выбранному высказыванию. Если при этом в выбранной формуле содержится случайная величина, то с помощью уже известных приемов находится реализация этой случайной величины и подставляется в нее. Чтобы убедиться в правильности предлагаемого алгоритма и понять соображения, на основании которых построены высказывания, достаточно подставить все возможные значения случайных величин и сравнить результат с получаемым с помощью матрицы. Рассмотренный логический прием применим также при имитации поведения объектов, более сложных, чем цепь Маркова. Использование его в более сложных ситуациях – составная часть идеи автоматного моделирования информационных систем. **Заключение.** Полученные в работе алгоритмы формирования псевдослучайных чисел для имитации компонентов информационной системы достаточно адекватны, однако их эффективность определяется отношением части площади прямоугольника, расположенной под кривой, ко всей его площади. Если это отношение мало, то значительная часть машинного времени расходуется на непроизводительное получение случайных точек, лежащих под кривой и отбрасываемых в процессе вычислений. Отсюда следует, в частности, что для экспоненциального распределения указанный метод наименее, а для равномерного – наиболее эффективен. На практике таким методом целесообразно пользоваться, когда указанное отношение превышает величину 0,3. В некоторых случаях его можно применять и тогда, когда это отношение больше 0,1.

Ключевые слова: алгоритм, закон распределения, модель, машина, натуральный эксперимент, случайное число

Для цитирования: Баркалов С.А., Серебрякова Е.А., Нижегородов К.А. Алгоритмы формирования последовательности псевдослучайных чисел в натурном эксперименте при имитации процессов функционирования сложных информационных систем // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 1. С. 52–62. DOI: 10.14529/ctcr240105

ALGORITHMS OF FORMING OF THE SEQUENCE OF PSEUDORANDOM NUMBERS IN THE NATURAL EXPERIMENT AT SIMULATION OF PROCESSES OF FUNCTIONING OF COMPLEX INFORMATION SYSTEMS

S.A. Barkalov, sbarkalov@vgasu.vrn.ru

E.A. Serebryakova, sea-parish@mail.ru

K.A. Nizhegorodov, upr_stroy_kaf@vgasu.vrn.ru

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. In this work is considered information systems: its structure and influencing factors of the external environment that allows to describe its simulation means. Elements for the description of similar systems are algebraic differential equations, Markov chains or similar of the **Research objective** consists in forming of conditions of carrying out a natural experiment not on the studied system, and on some other (with the known distribution parameters of the studied random variable, for example, of the distribution law), rather “similar” to given and such which experimental functioning will not lead to a little notable costs. **Research methods.** At simulation of processes of Markov the difficulties connected with need of input in memory of the machine of stochastic matrixes of infinite dimension very often meet. It is actually very difficult to present an infinite stochastic matrix in which all elements are selected “purely accidentally”, i.e. without any patterns. In practice there are always only such matrixes in which, since some line, a certain pattern in formation of elements is shown. The solution of the specified problem is based on this property. **Results.** The algorithm of finding of a random variable consists in the choice of that from expressions which at this value is true. Then the following implementation is on the formula corresponding to the selected expression. If at the same time the selected formula contains a random variable, then by means of already known receptions there is implementation of this random variable and is substituted in it. To be convinced of correctness of the offered algorithm and to understand reasons on the basis of which expressions are constructed it is enough to substitute all possible values of random variables and to compare result to received by means of a matrix. The considered logical reception is applicable also at simulation of behavior of the objects, more difficult, than a Markov chain. Its use in more difficult situations – a component of the idea of automatic modeling of information systems. **Conclusion.** The algorithms of forming of pseudorandom numbers received in work for simulation of components of an information system are rather adequate, however their efficiency is defined by the relation of a part of the square of a rectangle located under a curve to all its area. If this relation is not enough, then a considerable part of machine time is spent for unproductive receiving the accidental points lying under a curve and discarded in the course of calculations. From here follows, in particular, that for exponential distribution the specified method least, and for uniform is most effective. In practice it is reasonable to use such method when the specified relation exceeds value 0.3. In certain cases it can be applied and when this relation more than 0.1.

Keywords: algorithm, distribution law, model, machine, natural experiment, random number

For citation: Barkalov S.A., Serebryakova E.A., Nizhegorodov K.A. Algorithms of forming of the sequence of pseudorandom numbers in the natural experiment at simulation of processes of functioning of complex information systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(1):52–62. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240105

Введение

Предположим, что все составные части некоторой информационной системы – ее структуры и факторы воздействия внешней среды – имеют математическую природу. В этом случае они являются абстрактными объектами или же структурами со свойствами объекта. В этом случае следует считать такую систему моделируемой имитационными средствами. Элементами для описания подобных систем являются алгебраические дифференциальные уравнения, цепи Маркова или аналогичные им. Имитационное моделирование придает понятию сложности рассматриваемой системы более глубокий смысл. К примеру, из двух моделируемых систем более сложной предпочтительнее считать ту, в которой для её описания при поддержке некоторого алгоритмического языка потребуется больше символов уникада. Само собой разумеется, что вводимое та-

ким способом определение понятия сложности системы зависит от выбора алгоритмического языка, который избыточен. Если подобные системы S_1 и S_2 различны по своей природе, например S_2 математическая, а S_1 информационная система, то математическую систему S_2 будем называть математической моделью информационной системы S_1 .

Во многих случаях расчеты методом имитационного моделирования могут привести к существенным неточностям. Это объясняется в основном недостаточной достоверностью данных, используемых в расчетах, а также тем, что применяемый при вычислениях простейший алгоритм не учитывает некоторых закономерностей, имеющих место в действительности. Если полученные (с допущенными неточностями) данные принять за истинные и использовать при проектировании информационной системы, то после запуска система будет функционировать далеко не оптимально. Поэтому одни узлы сети будут работать с повышенной нагрузкой, другие, наоборот, с недостаточной. Для совершенствования системы вновь потребуются количественные расчеты, которые также невозможно выполнить идеально точно. Весь процесс повторится сначала, и система постепенно приведет к такому режиму функционирования и такой структуре, которые в данных условиях будут обеспечивать достаточно эффективную ее работу [1].

Описанный процесс является ни чем иным, как регулированием системы с помощью натурального эксперимента. Оптимизация системы с помощью натурального эксперимента – очень дорогостоящее мероприятие. Она может продолжаться довольно длительное время, в течение которого система будет работать убыточно. Кроме того, в ряде случаев натуральный эксперимент вообще невозможен (например, когда его проведение может привести к катастрофическому ущербу или человеческим жертвам).

Тогда целесообразно провести эксперимент не на самой системе, а на некоторой другой, достаточно «похожей» на данную и такой, экспериментальное функционирование которой не приведет к сколько-нибудь ощутимым издержкам [2].

Постановка задачи

Рассмотрим простейшие случаи синтеза имитационных моделей процессов информационно-взаимодействия агентов сложных комбинированных информационных систем управления на основе моделирования случайных воздействий. Эта часть метода моделирования является очень важной составляющей практически в любой статистике для формирования адекватных датасетов с последующим машинным обучением [3].

Моделируемая система подвержена случайным воздействиям. Они могут носить разнообразный характер: от отдельных взаимно не зависящих величин до взаимосвязанных и конечных количеств или некоторого произвольного процесса (например, цепи Маркова). В первую очередь, при конструировании автоматных моделей важным является первый из всех перечисленных случаев. Существует несколько приемов для имитации совокупности взаимосвязанных случайных величин, это воспроизведение их значений по заданной матрице и поиск похожих элементов.

Рассмотрим способы и механизмы генерации случайных чисел с заданным законом распределения. Эти числовые последовательности являются эмпирическими и их вероятностное распределение в некотором смысле отличается от определенного теоретического распределителя [4].

Все случайные величины в теории вероятностей можно разделить на дискретные, непрерывную и смешанную. Только определенные отдельные значения имеют дискретные величины. Множество допустимых значений дискретной случайной величины может быть либо конечным, либо счетным. Разумеется, нередки случаи, когда случайная величина принимает только целочисленные значения. Также двоичной называется случайная величина с двумя значениями: 0 и 1.

Дискретная случайная величина задается с помощью распределения вероятностей p_k ($k = 0, 1, 2, \dots$) того, что она примет значение, равное k .

Перечислим некоторые наиболее распространенные типы распределений дискретных случайных величин.

1. Распределение Бернулли (для двоичной случайной величины):

$$p_0 = 1 - p; p_1 = p; p_k = 0 \text{ при } k > 1.$$

Здесь через p обозначен единственный в данном случае параметр распределения ($0 \leq p \leq 1$).

2. Распределение Пуассона:

$$p_k = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad (0 < \lambda < +\infty; k = 0, 1, 2, \dots).$$

3. Биноминальное распределение:

$$p_k = C_n^k p^k (1-p)^{n-k-1} \quad \text{при } k = \overline{0, n},$$

$$p_k = 0 \quad \text{при } k > n \quad (0 < p < 1; n - \text{целое число}).$$

4. Геометрическое распределение:

$$p_k = (1-p)^{n-k-1} \quad (k = 0, 1, 2, \dots; 0 < p < 1).$$

5. Дискретное равномерное распределение:

$$p_k = \frac{1}{n} \quad \text{при } k = \overline{1, n} \text{ и } p_k = 0 \quad \text{при } k > n \quad (n - \text{целое число}).$$

Непрерывный случайный интервал имеет возможность принимать значение из бесконечно малого или большого непрерывного промежутка. Непрерывная функция распределения, в свою очередь, составляется на базе вероятности $F(x)$. Вероятность значения случайной величины не может быть более 0 процентов. Если говорить о распределениях непрерывных случайных величин, то можно привести следующие примеры [5].

1. Показательное (экспоненциальное) распределение:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0, \\ 1 - e^{-\lambda x} & \text{при } x > 0, \end{cases} \quad (0 < \lambda < +\infty).$$

Случайная величина, распределенная по этому закону, может принимать лишь неотрицательные значения.

2. Нормальное распределение:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(z-a)^2}{2\sigma^2}} dz \quad (-\infty < a < +\infty, \sigma \geq 0).$$

Нормально распределенная случайная величина принимает не только положительные, но и отрицательные значения.

3. Равномерное распределение на отрезке $[a, b]$:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{при } a < x \leq b, \\ 1 & \text{при } x > b. \end{cases} \quad (-\infty < a < b < +\infty),$$

4. Усеченное нормальное распределение с точками усечения c_1 и c_2 :

$$F(x) = \frac{\Phi(x) - \Phi(c_1)}{\Phi(c_2) - \Phi(c_1)},$$

где $\Phi(x)$ – обычная нормальная функция распределения и $-\infty \leq c_1 < c_2 \leq +\infty$.

При $c_1 = -\infty$ получается одностороннее усечение справа в точке c_2 при $c_2 = +\infty$ – одностороннее усечение слева в точке c_1 .

Если одновременно $c_1 = -\infty$, а $c_2 = +\infty$, то усеченное распределение превращается в неусеченное.

Смешанной случайной величиной назовём такую величину, значение которой может быть как изолированным от прочих точек на числовой оси, так и постоянно расположенным в одной из её частей. Рассмотрим две конкретные разновидности смешанных распределений [6].

Смешанное показательное распределение: с вероятностью p_0 случайная величина принимает значение 0, а с вероятностью $p_0 = 1 - p_0$ – значение, совпадающее с одной из реализаций случайной величины, распределенной по показательному закону.

Смешанное усеченное нормальное распределение: с вероятностью p_0 случайная величина принимает значение 0, а с противоположной вероятностью $p_0 = 1 - p_0$ – значение, совпадающее с реализацией случайной величины, имеющей усеченное нормальное распределение.

Довольно часто приходится иметь дело с ситуациями, когда случайная величина получается при моделировании не по определенному теоретическому распределению определенного вида, а, скорее, эмпирическому представлению, полученному на основе статистических данных [7].

Такие эмпирические распределения могут иметь произвольный характер (асимметричность, многомодальность и т. д.), они не имеют точной степени приближения к некоторым известным теоретическим распределениям или являются достаточно беспорядочными. Тогда указанное эмпирическое распределение может быть введено в машину посредством значений ординат плотно-

сти распределения через произвольные временные интервалы или при помощи некоторого уравнения, приближенно воспроизводящего начальную плотность этого определения.

Для получения значения случайной величины с заданным законом распределения чаще всего пользуются одним или несколькими из множества равно распределенных случайных чисел. В связи с этим получение равномерных распределенных случайных чисел на ЭВМ имеет огромное значение. Существует множество способов, как можно с помощью ЭВМ решить проблему имитации неравномерно распределенных случайных величин. Некоторые результаты, на которых стоит заострить внимание, представлены в работе [8].

Другим способом является ввод в память ЭВМ таблиц равномерно распределенных случайных чисел и считывание их по ходу решения. Применение таблиц, в которых равномерно распределенные числа зачисляются во внешнюю память машины, приводит к росту обращений к работающим устройствам и снижению скорости работы ЭВМ. Это увеличивает сложность программы и уменьшает надёжность решения. Также для решения больших задач зачастую необходимы сотни тысяч и даже миллионы случайных чисел, что во много раз больше объема имеющихся в настоящее время таблиц равно распределенных случайным образом чисел [9].

С помощью генераторов случайных чисел можно получить свободно распределенные случайные числа. Эти устройства создают результаты некоторого случайно выполняющегося физического процесса в последовательности двоичных разрядов машины и дают возможность получения реализации разнообразных значений. При систематическом применении метода статистических испытаний на данной ЭВМ, возможно, потребуется создание датчика случайных чисел. Если иного нет – разумнее применять так называемые псевдослучайные последовательности, вырабатываемые электронной вычислительной машиной при поддержке особых подпрограмм.

Данный метод широко распространен в наше время, заключается он в следующем. Программистский способ получения случайных чисел – в ЭВМ используется некоторое рекуррентное соотношение: каждое последующее число происходит из предыдущего (или группы предыдущих) при помощи использования алгоритма, состоящего из арифметических и логических операций. Так, к примеру, простейший арифметический расчет, предложенный Нейманом, заключается в том, что берется некоторое произвольное число, состоящее из двоичных цифр, и возводится равным квадратом [10]. По итогу мы получили число, состоящее из цифр, в котором после каждого последующего выбрасывается по одной цифре с обоих концов (остается «середина произведения»). Вновь данный процесс возведения в квадрат и отбрасывания цифр многократно повторяется, получаемые «середины квадратов» – это ровно распределенные промежутки (частицы случайного происхождения) последовательностей случайных чисел. На практике чаще используются более сложные алгоритмы [11], позволяющие получить распределение лучшего качества и учитывающие особенности ЭВМ. Каждая из этих последовательностей чисел находит соответствие с известными критериями случайной природы, хотя входящие в них числа взаимно зависимы друг от друга.

Такой способ имеет недостатки. В первую очередь, разработанные при поддержке специальных программ последовательности случайных чисел являются периодическими и потому даже очень длинные их комбинации не будут случайными. Увеличение периода последовательности может несколько снизить скорость работы машины. Также распределение выработанных программным способом случайных чисел в большинстве случаев не отличается от теоретического. Такое расхождение, незначительное в одномерном случае, начинает влиять на формирование из последовательности равномерно распределенных чисел разнообразных многомерных вычислений [3].

В то же время, несмотря на все недостатки метода Монте-Карло, метод псевдослучайных чисел имеет большое распространение среди исследователей. Рассмотрим вероятность получения псевдослучайных чисел, равномерно распределенных на отрезке. Исходными данными для получения равномерно распределенных на отрезке $[0,1]$ псевдослучайных чисел служат два положительных целых числа p и g , причем p должно быть простым и представляемым в виде $p = 2p_1 + 1$, где p_1 – также некоторое положительное простое число.

При этом g должно быть близким к половине числа p и допускать представление в виде $g = p - 3m$, где m – некоторое положительное целое [12].

Если с помощью фигурных скобок обозначить операцию взятия дробной части числа, а с помощью квадратных – операцию выделения целой части, то последовательность равномерно рас-

пределенных на отрезке $[0,1]$ случайных чисел $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots$ может быть получена по рекуррентным формулам:

$$\begin{aligned} R_k &= r_{k-1}g, \quad \xi_k = \left\{ R_k/p \right\}, \\ r_k &= R_k - p \left[R_k/p \right] \quad (k = 1, 2, 3, \dots), \end{aligned} \quad (1)$$

где R_k и r_k – промежуточные последовательности и $r_0 = 1$.

Полученные таким образом псевдослучайные числа повторяются с периодом $p - 1$.

Числа p и g , служащие исходными данными для работы подпрограммы, выбираются так, чтобы заведомо избежать повторения в ходе решения всей задачи [13].

Последовательность псевдослучайных чисел, распределенных нормально с параметрами a и σ , можно получить способом, основанным на приближенной имитации условий, при которых оказывается справедливой центральная предельная теорема теории вероятностей. В силу центральной предельной теоремы суммы большого числа случайных слагаемых при выполнении некоторых весьма общих условий имеют асимптотически нормальное распределение. Поэтому для приближенного моделирования можно воспользоваться суммированием чисел исходной совокупности, равномерно распределенных на отрезке $[0, 1]$.

Пусть ξ_i ($i = 1, 2, \dots$) – псевдослучайные числа, равномерно распределенные на отрезке $[0,1]$ с математическим ожиданием $0,5$ и средним квадратическим отклонением $\frac{1}{2\sqrt{3}}$ [4].

Тогда при достаточно больших m сумма $\eta = \sum_{i=1}^m \xi_i$ распределена асимптотически нормально с параметрами $a' = \frac{m}{2}$; $\sigma' = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{m}{3}}$, а псевдослучайные числа, распределенные нормально с заданными параметрами a и σ , могут быть найдены по формуле

$$\eta_k = \frac{\sum_{i=1}^m \xi_i - \frac{m}{2}}{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{m}{3}}} \sigma + a = \left(\frac{2}{\sqrt{m}} \sum_{i=1}^m \xi_i - \sqrt{m} \right) \sigma \sqrt{3} + a. \quad (2)$$

Для получения последовательности псевдослучайных чисел, соответствующих показательному закону распределения, используется формула

$$x = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - \xi_i),$$

где λ – параметр распределения; ξ_i – последовательность случайных чисел, равномерно распределенных на отрезке.

Этот способ [14] широко применяется на практике, так как не приводит к загрузке оперативной памяти машины.

При решении практических задач часто приходится оперировать случайными величинами, распределенными по некоторым специальным законам. Приведенные ниже распределения будут полезны при реализации отдельных моделей.

1. Смешанное усеченное нормальное распределение: случайная величина ξ с вероятностью p_0 ($0 \leq p_0 \leq 1$) принимает значение 0 , а с вероятностью $(1 - p_0)$ – значение, совпадающее с одной из реализаций случайной величины η , распределенной по усеченному нормальному закону:

$$F(x) = P\{\eta \leq x\} = \begin{cases} 0 & \text{при } x < c_1, \\ \frac{\Phi(x) - \Phi(c_1)}{\Phi(c_2) - \Phi(c_1)} & \text{при } c_1 \leq x < c_2, \\ 1 & \text{при } x \geq c_2, \end{cases} \quad (3)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx$ – функция обычного (неусеченного) нормального распределения с математическим ожиданием a ($-\infty < a < +\infty$) и дисперсией σ^2 ($0 \leq \sigma < +\infty$); c_1 и c_2 – соответственно левая и правая точки усечения.

Таким образом, смешанное усеченное нормальное распределение определяется с помощью пяти параметров: p_0, c_1, c_2, a, σ .

В частном случае, когда распределение не является смешанным, следует положить $p_0 = 0$.

В других частных случаях, когда усечение является односторонним слева, справа или вообще отсутствует, надо принять соответственно:

$$c_2 = k_2, \quad c_1 = k_1, \quad \begin{cases} c_1 = k_1, \\ c_2 = k_2, \end{cases} \quad (4)$$

где в качестве k_1 берется некоторая достаточно большая по абсолютной величине отрицательная константа; k_2 – достаточно большая положительная константа.

Конкретный выбор k_1 и k_2 осуществляется исходя из разрядности ЭВМ.

2. Смешанное показательное распределение: случайная величина ξ с вероятностью p_0 ($0 \leq p_0 \leq 1$) принимает значение 0, а с вероятностью $(1 - p_0)$ совпадает с одной из реализаций случайной величины η , распределенной по показательному закону:

$$G(x) = P\{\eta \leq x\} = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0, \\ 1 - e^{-\lambda x} & \text{при } x > 0, \end{cases} \quad (0 \leq \lambda < +\infty). \quad (5)$$

Параметрами смешанного показательного распределения являются два числа: p_0 и λ . Частный случай, когда распределение не является смешанным, осуществляется аналогично изложенному выше.

3. Конечное дискретное распределение: определяется с помощью вероятностей $p_k = P\{\xi = k\}$ ($k = \overline{0, n}$; n – некоторое фиксированное положительное целое; $0 \leq p_k \leq 1$; $\sum_{k=0}^n p_k = 1$). Задание этого распределения в общем случае осуществляется с помощью $n + 1$ числа p_k ($k = \overline{0, n}$).

Чтобы получить случайные числа, распределенные по одному из трех перечисленных законов, используемых в дальнейшем при решении сложных экономических систем, составляют специальную подпрограмму псевдослучайных чисел [14].

Основным блоком подпрограммы является блок получения равномерно распределенных на отрезке $[0, 1]$ случайных чисел. Остальные блоки подпрограммы используют результаты работы основного блока и осуществляют преобразование равномерно распределенных случайных чисел в случайные числа, распределенные по требуемому закону.

Псевдослучайные числа, распределенные по смешанному усеченному нормальному закону, получают с помощью центральной предельной теоремы.

Получение псевдослучайных чисел, распределенных по показательному закону, осуществляется по формуле

$$x = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - \xi_i) \quad (i = 1, 2, \dots). \quad (6)$$

Для получения псевдослучайных чисел, распределенных по дискретному закону, использовался метод последовательного сравнения очередной реализации равномерно распределенного на отрезке $[0, 1]$ случайного числа с последовательностью сумм $S_k = \sum_{i=0}^k p_i$ ($k = \overline{0, n}$).

Алгоритм указанного метода можно представить следующим образом.

Шаг 1. Формирование суммы $S_0 = p_0$.

Шаг 2. Выборка равномерно распределенного на отрезке $[0, 1]$ случайного числа ξ .

Шаг 3. Сравнение ξ со значением текущей суммы S_k . Если $\xi < S_k$, то производится фиксация $\xi = k$ и осуществляется выход из подпрограммы. В противном случае производится формирование очередной суммы $S_{k+1} = S_k + p_{k+1}$ и переход к выполнению шага 2. Так как $\xi \leq 1$ и $\sum_{k=0}^n p_k = 1$, то во всех случаях процесс должен закончиться фиксацией некоторого значения x и выходом из подпрограммы.

Подпрограмма состоит из номеров ячеек, в которые помещаются исходные параметры и номера ячейки для передачи управления на некоторый ее вход. При использовании подпрограммы требуется пересылка необходимых значений параметров в отведенные для них ячейки, информации о передаче управления после выполнения операции выборки и номеров ячеек.

Данная подпрограмма занимается получением случайных чисел, которые используются при моделировании случайной величины процессов для решения многих экономических задач. Имея вспомогательные и случайные элементы, она даёт возможность создать произвольное множество чисел или случайных процессов для моделирования достаточно обширного перечня задач.

Опишем алгоритм получения псевдослучайных чисел, распределенных в соответствии с некоторой произвольной плотностью вероятностей $f(x)$, которая может быть определена на основании статистических данных [8].

Для функции $f(x)$ как плотности некоторого распределения справедливо соотношение $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$, поэтому она должна быть или сосредоточенной на конечном промежутке, или асимптотически приближаться к горизонтальной оси для достаточно больших и достаточно малых значений x .

С большей или меньшей погрешностью можно указать такой прямоугольник с вершинами $(a, 0), (a, c), (b, c), (b, 0)$, что вся кривая плотности распределения $f(x)$, за исключением, может быть, отбрасываемых близких к горизонтальной оси асимптотических участков, будет заключена внутри этого прямоугольника.

Тогда алгоритм получения случайных чисел может быть представлен в следующей форме.

Шаг 1. Находятся два случайных числа α_1 и α_2 , каждое из которых распределено на отрезке $[0, 1]$.

Шаг 2. Найденные случайные числа преобразуются в координаты случайной точки, равномерно распределенной в прямоугольнике с вершинами $(a, 0), (a, c), (b, c), (b, 0)$, т. е. $\beta_1 = a + \alpha_1(b - a)$; $\beta_2 = \alpha_2 c$.

Шаг 3. Проверяется положение полученной случайной точки относительно графика функции $f(x)$; если точка расположена выше кривой, т. е. если $\beta_2 > f(\beta_1)$, то все действия повторяются снова (с шагом 1), в противном случае величина β_1 принимается за очередную реализацию моделируемой случайной величины.

Частоты попадания значений получаемых случайных чисел в интервалы отрезка $[a, b]$ будут пропорциональны площадям криволинейных трапеций, расположенных над этими отрезками под кривой $f(x)$, следовательно, функция $f(x)$ будет плотностью распределения.

При имитации процессов Маркова очень часто встречаются трудности, связанные с необходимостью ввода в память машины стохастических матриц бесконечной размерности. Фактически очень трудно представить бесконечную стохастическую матрицу, в которой все элементы выбраны «чисто случайно», т. е. без каких бы то ни было закономерностей.

На практике всегда случаются только такие матрицы, в которых, начиная с некоторой строки, проявляется определенная закономерность в образовании элементов. На этом свойстве основывается решение указанной проблемы.

Предположим, что рассматриваемая простая однородная цепь Маркова имеет матрицу вероятностей перехода следующего вида (табл. 1).

Матрица вероятностей перехода

Таблица 1

Matrix of transition probabilities

Table 1

	0	1	2	3	4	...
0	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4	...
1	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4	...
2	0	1	0	0	0	...
3	$q_0 + q_1$	q_2	q_3	q_4	q_5	...
4	q_0	q_1	q_2	q_3	q_4	...
5	0	q_0	q_1	q_2	q_3	...
6	0	0	q_0	q_1	q_2	...
...

Примечание:

p_i и q_k – такие числа, что $0 \leq p_i \leq 1$; $0 \leq q_k \leq 1$,

$(i = 0, 1, 2, \dots, k = 0, 1, 2, \dots)$;

$\sum_{k=0}^{\infty} p_i = 1$ и $\sum_{k=0}^{\infty} q_k = 1$.

Задача заключается в построении алгоритма нахождения реализации случайной величины $a(t + 1)$ по известной реализации случайной величины $a(t)$.

Обозначим через ξ и η дискретные взаимно независимые случайные величины, вероятностными распределениями которых служат соответственно последовательности $\{p_i\}$ и $\{q_k\}$. Ввести в машину эти последовательности не составляет трудности.

Построим следующую (конечную) полную систему логических высказываний и соответствующих этим высказываниям формул (табл. 2).

Система логических высказываний и формул
System of logical expressions and formulas

Таблица 2

Table 2

Высказывание	Формула
$a(t) < 2$	$a(t + 1) = \xi$
$a(t) = 2$	$a(t + 1) = 1$
$a(t) > 2$	$a(t + 1) = \max\{0, a(t) + \eta - 4\}$

Алгоритм нахождения $a(t + 1)$ чрезвычайно прост. Вначале выбирается то из высказываний, которое при данном значении $a(t)$ является истинным. Затем реализация $a(t + 1)$ находится по формуле, соответствующей выбранному высказыванию. Если при этом в выбранной формуле содержится случайная величина, то с помощью уже известных приемов находится реализация этой случайной величины и подставляется в формулу. Чтобы убедиться в правильности предлагаемого алгоритма и понять соображения, на основании которых построены высказывания и формулы, достаточно подставить все возможные значения случайных величин $a(t)$, ξ и η в формулы и сравнить результат с получаемым с помощью матрицы.

Рассмотренный логический прием применим также при имитации поведения объектов, более сложных, чем цепь Маркова. Использование его в более сложных ситуациях – составная часть идеи автоматного моделирования сложных систем.

Выводы

Описанный алгоритм внешне весьма привлекателен, однако при более подробном рассмотрении оказывается, что он эффективен далеко не всегда. Эффективность характеризуется отношением части площади прямоугольника, расположенной под кривой, ко всей его площади. Если это отношение мало, то значительная часть машинного времени расходуется на непроизводительное получение случайных точек, лежащих под кривой и отбрасываемых в процессе вычислений. Отсюда следует, в частности, что для экспоненциального распределения указанный метод наименее, а для равномерного – наиболее эффективен. На практике таким методом целесообразно пользоваться, когда указанное отношение превышает величину 0,3. В некоторых случаях его можно применять и тогда, когда это отношение больше 0,1.

Список литературы

1. Баркалов С.А., Бурков В.Н., Порядина В.Л. Механизмы активной экспертизы в задачах комплексного оценивания // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5, № 6. С. 64–67.
2. Белоусов В.Е., Абросимов И.П., Губина О.В. Алгоритм идентификации состояний многоуровневой технической системы с использованием расплывчатых категорий модели представления знаний // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. № 3. 2017. С. 124–129.
3. Jordan M.I. Attractor dynamics and parallelism in a connectionist sequential machine // The Eighth Annual Conference of the Cognitive Science Society. Amherst, MA, 1986. P. 531–546.
4. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. М.: Высшая школа. 2004. 341 с.
5. Белоусов В.Е., Баркалов С.А., Нижегородов К.А. Ресурсно-временной анализ в задачах календарного планирования строительных предприятий // Материалы XVI Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами». Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2019. Т. 1. С. 98–101.
6. Вапник В.Н. Восстановление зависимости по эмпирическим данным. М.: Наука, 1979. 295 с.
7. Osherson D.N., Weinstein S., Stoli M. Modular learning // Computational Neuroscience / E.L. Schwartz (ed.). Cambridge, MA: MIT Press, 1990. P. 369–377.
8. Галинская А.А. Модульные нейронные сети: обзор современного состояния разработок // Математические машины и системы. 2003. № 3-4. С. 87–102.
9. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн; пер. с англ. и ред. И.В. Красикова. 2-е изд. М.: Вильямс, 2005. 1296 с.

10. Моделирование системы оценки компетенций в управлении профессорско-преподавательским составом вуза / С.А. Баркалов, В.Е. Белоусов, Н.Ю. Калинина и др. // XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2018): сб. докл. в 2 т. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. Т. 1. С. 355–358.

11. Белоусов В.Е., Нижегородов К.А., Соха И.С. Алгоритмы получения упорядоченных правил предпочтения в задачах принятия решений при планировании производственных программ // Управление строительством. 2019. № 1 (14). С. 105–111.

12. Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М. Анализ временных рядов и прогнозирование. М.: Финансы и статистика, 2001. С. 203–211.

13. Губко М.В., Караваев А.П. Согласование интересов в матричных структурах управления // Автоматика и телемеханика. 2001. № 10. С. 112–119.

14. Hart O.D., Holmstrom B. Theory of contracts // *Advances in economic theory. 5-th World Congress.* Cambridge: Cambridge Univ. Press; 1987. P. 71–155.

References

1. Barkalov S.A., Burkov V.N., Porjadina V.L. Mechanisms of active examination in problems complex estimation. *Bulletin of Voronezh state technical university.* 2009;5(6):64–67. (In Russ.)

2. Belousov V.E., Abrosimov I.P., Gubina O.V. [An algorithm of identification of conditions of a multilevel technical system with use of indistinct categories of model of representation of knowledge]. *Proceedings of Voronezh state university. Series: Systems analysis and information technologies.* 2017;3:124–129. (In Russ.)

3. Jordan M.I. Attractor dynamics and parallelism in a connectionist sequential machine. In: *The Eighth Annual Conference of the Cognitive Science Society.* Amherst, MA; 1986. P. 531–546.

4. Gorelik A.L., Skripkin V.A. *Metody raspoznavaniya* [Recognition methods]. Moscow: Vysshaya shkola; 2004. 341 p. (In Russ.)

5. Belousov V.E., Barkalov S.A., Nizhegorodov K.A. [Resource timing analysis in problems of scheduling of the construction enterprises]. In: *Materials of the XVI All-Russian school conference of young scientists “Management of big systems”.* Tambov: TSTU Publ.; 2019. Vol. 1. P. 98–101. (In Russ.)

6. Vapnik V.N. *Vosstanovlenie zavisimosti po empiricheskim dannym* [Recovery of dependence according to empirical data]. Moscow: Nauka; 1979. 295 p. (In Russ.)

7. Osherson D.N., Weinstein S., Stoli M. Modular learning. In: Schwartz E.L. (ed.). *Computational Neuroscience.* Cambridge, MA: MIT Press; 1990. P. 369–377.

8. Galinskaya A.A. [Modular neural networks: review of the current state of developments]. *Mathematical machines and systems.* 2003;3-4:87–102. (In Russ.)

9. Cormen T.H., Leiserson Ch.E., Rivest R.L., Stein C. *Introduction to algorithms.* Transl. from Engl. 2nd ed. Moscow: Vil'yams; 2005. 1296 p. (In Russ.)

10. Barkalov S.A., Belousov V.E., Kalinina N.Yu., Nasonova T.V., Fomina M.A., Leksashov A.V. [Modeling of a system of assessment of competences of management of the faculty of higher education institution]. *XXI International conference on soft calculations and measurements (SCM-2018)*, in 2 volumes. St. Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”; 2018. Vol. 1. P. 355–358. (In Russ.)

11. Belousov V.E., Nizhegorodov K.A., Soha I.S. Algorithms of obtaining the ordered rules of preference in problems of decision-making when planning production programs. *Upravleniye stroitel'stvom.* 2019;1(14):105–111. (In Russ.)

12. Afanas'ev V.N., Yuzbashev M.M. *Analiz vremennykh ryadov i prognozirovanie* [Analysis of time series and forecasting]. Moscow: Finansy i statistika; 2001. P. 203–211. (In Russ.)

13. Goubko M.V., Karavaeva A.P. Interest Reconciliation in Matrix Control Structures. *Automation and Remote Control.* 2001;62(10): 1658–1672. DOI: 10.1023/A:1012414500272

14. Hart O.D., Holmstrom B. Theory of contracts. In: *Advances in economic theory. 5-th World Congress.* Cambridge: Cambridge Univ. Press; 1987. P. 71–155.

Информация об авторах

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; sbarkalov@vgasu.vrn.ru.

Серебрякова Елена Анатольевна, канд. экон. наук, доц., доц. кафедры цифровой и отраслевой экономики, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; sea-parish@mail.ru.

Нижегородов Кирилл Александрович, аспирант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; upr_stroy_kaf@vgasu.vrn.ru.

Information about the authors

Sergey A. Barkalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sbarkalov@vgasu.vrn.ru.

Elena A. Serebryakova, Cand. Sci. (Econ.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Digital and Industrial Economics, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sea-parish@mail.ru.

Kirill A. Nizhegorodov, Postgraduate student of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; upr_stroy_kaf@vgasu.vrn.ru.

Статья поступила в редакцию 30.10.2023

The article was submitted 30.10.2023

ВЫДЕЛЕНИЕ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ИНЕРЦИОННЫХ СИЛ ИЗ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ И КОРИОЛИСОВЫХ ИНЕРЦИОННЫХ СИЛ

А.И. Телегин, teleginai@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, Миасс, Россия

Аннотация. Целью исследования является выделение в уравнениях динамики механических систем обобщенных гироскопических инерционных сил, состоящих из части центробежных и кориолисовых инерционных сил, с указанием тел, движения которых формируют эти силы. **Методы** исследования относятся к механике систем тел, системному анализу и робототехнике. **Результаты** исследования позволяют выписывать общие формулы вычисления обобщенных центробежных, кориолисовых и гироскопических инерционных сил через частные производные по обобщенным координатам от элементов матрицы инерционных коэффициентов в выражении кинетической энергии произвольной механической системы. В процессе анализа этих формул для систем тел со структурой открытого дерева, например, орбитальных станций с манипуляторами на борту или шагающих аппаратов в одноопорной фазе ходьбы, выделены тела, движения которых влияют на возникновение перечисленных инерционных сил. Для манипуляционных систем роботов приведены примеры уравнений динамики, в которых выделены все возможные инерционные силы и указаны тела, их формирующие. **Заключение.** Выделение гироскопических сил позволяет упростить формулу вычисления потребляемой мощности приводов, так как мощность этих сил равна нулю. Этот факт, в частности, позволяет упростить выражение минимизируемого функционала в задаче энергетически оптимального управления. Выделенные центробежные силы можно использовать для реализации программных движений некоторых тел манипуляторов с полярной, цилиндрической, сферической и ангулярной системами координат без затрат потребляемой мощности их приводов.

Ключевые слова: системы тел, уравнения динамики, инерционные силы (центробежные, кориолисовы, гироскопические), манипуляторы

Для цитирования: Телегин А.И. Выделение гироскопических инерционных сил из центробежных и кориолисовых инерционных сил // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 1. С. 63–74. DOI: 10.14529/ctcr240106

Original article
DOI: 10.14529/ctcr240106

SEPARATION OF GYROSCOPIC INERTIAL FORCES FROM CENTRIFUGAL AND CORIOLIS INERTIAL FORCES

A.I. Telegin, teleginai@susu.ru

South Ural State University, Miass, Russia

Abstract. The purpose of the study is to identify in the equations of dynamics of mechanical systems generalized gyroscopic inertial forces, consisting of a part of centrifugal and Coriolis inertial forces, indicating the bodies whose movements form these forces. **The methods** of research refer to mechanics of body systems, systems analysis and robotics. **The results** of the study allow us to write out general formulas for calculating generalized centrifugal, Coriolis and gyroscopic inertial forces through partial derivatives on generalized coordinates from elements of the matrix of inertial coefficients in the expression of kinetic energy of arbitrary mechanical system. In the process of analyzing these formulas for systems of bodies with an open tree structure, such as orbital stations with manipulators on board or walking vehicles in the single-supported walking phase, the bodies whose movements affect the occurrence of the listed inertial forces are highlighted. For robot manipulation systems we present examples of the equations of dynamics,

in which all possible inertial forces are highlighted and the bodies that form them are indicated. **Conclusion.** Singling out the gyroscopic forces allows you to simplify the formula for calculating the power consumption of drives, because the power of these forces is zero. This fact, in particular, allows to simplify the expression of the minimizing functional in the problem of energy optimal control. The isolated centrifugal forces can be used to realize program motions of some bodies of manipulators with polar, cylindrical, spherical and angular coordinate systems without expenditure of power consumed by their drives.

Keywords: body systems, equations of dynamics, inertial forces (centrifugal, Coriolis, gyroscopic), manipulators

For citation: Telegin A.I. Separation of gyroscopic inertial forces from centrifugal and Coriolis inertial forces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(1): 63–74. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240106

Введение

Для управления механическими системами (МС), например, манипуляционными системами промышленных роботов, широко используются уравнения динамики (УД) [1, 2]. Эти УД чаще всего выводятся по формализму Лагранжа [3–5], реже по формализму Аппеля и другим формализмам [6]. Для использования формализма Лагранжа необходимо знать выражение Лагранжиана, т. е. разности кинетической и потенциальной энергии. Выражением кинетической энергии МС является квадратичная форма обобщенных скоростей, коэффициентами которой являются элементы матрицы инерционных коэффициентов (МИК). Вывод элементов МИК для МС с тремя и более подвижными телами является сложной и громоздкой задачей. Не менее сложно применять к кинетической энергии формализм Лагранжа. Поэтому в учебной и научной литературе чаще всего выводятся УД плоских двухзвенников [7–10]. Рассматриваются также конкретные МС [11–13] и их классы [14].

Несколько новых методов выписывания элементов МИК изложено в книге [15]. Там же по формализму Лагранжа выведены общие формулы для автоматического выписывания обобщенных инерционных сил (ОИС). В конкретных примерах, демонстрирующих эффективность предложенного формализма выписывания УД, из ОИС выделены гироскопические инерционные силы (ГИС). Но общие формулы отдельного выписывания центробежных инерционных сил (ЦИС), кориолисовых инерционных сил (КИС) и выделения среди них ГИС в книге [15] отсутствуют. В настоящей статье этот пробел устранен.

Постановка задачи. В статье ставится задача вывода общих формул для выписывания ОИС в виде суммы ЦИС, КИС и ГИС для произвольных механических систем с голономными стационарными связями и их распространения на два класса систем тел (СТ), на древовидные СТ с открытыми ветвями (ДСТОВ) и на СТ с одной открытой ветвью (СТОВ). В структуре формул для ДСТОВ и СТОВ должны быть явно выделены номера тел, движения которых порождают указанные ОИС. Эффективность предлагаемых формул можно продемонстрировать на примерах ручного выписывания ЦИС, КИС и ГИС ДСТОВ для типовых манипуляторов промышленных роботов.

1. Формализмы выписывания ОИС

Введем обозначения:

\dot{q}_i – i -я обобщенная скорость (ОС);

H_{ji} – элементы симметричной ($H_{ij} = H_{ji}$) положительно определенной матрицы инерционных коэффициентов (МИК);

q_1, q_2, \dots, q_N – обобщенные координаты (ОК);

$H_{jik} = \partial H_{ji} / \partial q_k, j \geq i$.

Утверждение 1. УД механической системы с голономными стационарными связями представимы в виде

$$\sum_{j=1}^{i-1} H_{ij} \ddot{q}_j + H_{ii} \ddot{q}_i + \sum_{j=i+1}^N H_{ji} \ddot{q}_j + h_{ci} + h_{oi} + h_{gi} = Q_{gi}, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$; Q_{gi} – i -я обобщенная движущая сила, включающая силу тяжести;

$$h_{ci} = 0,5H_{iii}\dot{q}_i^2 + \sum_{j=i+1}^N H_{jij}\dot{q}_j^2 \quad (2)$$

– ЦИС(i) – центробежная инерционная сила, действующая на i -е тело;

$$h_{oi} = 0,5\dot{q}_i \sum_{j=1}^{N/i} H_{ijj}\dot{q}_j + \sum_{j=i+1}^N \dot{q}_j \sum_{k=1}^{N/j} H_{jik}\dot{q}_k \quad (3)$$

– КИС(i) – кориолисова инерционная сила, действующая на i -е тело;

$$\partial T / \partial q_i = 0,5 \sum_{j=1}^N H_{jji}\dot{q}_j^2 + \sum_{k=2}^N \dot{q}_k \sum_{j=1}^{k-1} H_{kji}\dot{q}_j; \quad (4)$$

$$h_{gi} = \sum_{j=1}^{i-1} \dot{H}_{ij}\dot{q}_j + 0,5\dot{H}_{ii}\dot{q}_i - \partial T / \partial q_i \quad (5)$$

– ГИС(i) – гироскопическая инерционная сила, действующая на i -е тело.

В формуле (3) запись N/i в верхнем пределе суммирования указывает на то, что индекс суммирования не принимает значение i . Аналогично трактуется запись N/j .

Доказательство. Кинетическая энергия механической системы (МС) с голономными стационарными связями представима в виде

$$T = 0,5 \sum_{j=1}^N H_{jj}\dot{q}_j^2 + \sum_{k=2}^N \dot{q}_k \sum_{j=1}^{k-1} H_{kji}\dot{q}_j,$$

где в общем случае элементы МИК зависят от всех ОК. Из выражения T получим

$$\partial T / \partial \dot{q}_i = \sum_{j=1}^{i-1} H_{ij}\dot{q}_j + H_{ii}\dot{q}_i + \sum_{j=i+1}^N H_{ji}\dot{q}_j.$$

Согласно формализму Лагранжа УД МС представим в виде [16]

$$(\partial T / \partial \dot{q}_i)'_t - \partial T / \partial q_i = \sum_{j=1}^{i-1} H_{ij}\ddot{q}_j + H_{ii}\ddot{q}_i + \sum_{j=i+1}^N H_{ji}\ddot{q}_j + h_i = Q_{gi},$$

где h_i – i -я обобщенная инерционная сила (ОИС), вычисляемая по формулам:

$$h_i = h_{ai} + h_{bi} + h_{pi} - \partial T / \partial q_i,$$

$$h_{ai} = \sum_{j=1}^{i-1} \dot{H}_{ij}\dot{q}_j,$$

$$h_{bi} = \dot{H}_{ii}\dot{q}_i,$$

$$h_{pi} = \sum_{j=i+1}^N \dot{H}_{ji}\dot{q}_j, \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial q_i} = h_{di} + h_{ei},$$

$$h_{di} = 0,5 \sum_{j=1}^N H_{jji}\dot{q}_j^2,$$

$$h_{ei} = \sum_{k=2}^N \dot{q}_k \sum_{j=1}^{k-1} H_{kji}\dot{q}_j.$$

Из формул (6) следует искомая формула (4).

Выделим из ОИС гироскопические составляющие, т. е. ГИС. Для этого выполним следующие очевидные преобразования:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N h_{ei}\dot{q}_i &= \sum_{i=1}^N \dot{q}_i \sum_{k=2}^N \dot{q}_k \sum_{j=1}^{k-1} H_{kji}\dot{q}_j = \\ &= \sum_{k=2}^N \dot{q}_k \sum_{j=1}^{k-1} \dot{q}_j \sum_{i=1}^N H_{kji}\dot{q}_i = \sum_{i=2}^N \dot{q}_i \sum_{j=1}^{i-1} \dot{q}_j \dot{H}_{ij}. \end{aligned}$$

Теперь

$$\sum_{i=1}^N (h_{ai} - h_{ei})\dot{q}_i = \sum_{i=1}^N \dot{q}_i \sum_{j=1}^{i-1} \dot{H}_{ij}\dot{q}_j - \sum_{i=2}^N \dot{q}_i \sum_{j=1}^{i-1} \dot{q}_j \dot{H}_{ij} = 0.$$

Следовательно, по определению Тэта (мощность ГИС равна нулю [16]) выражение $h_{ai} - h_{ei}$ входит в формулу вычисления ГИС(i). Аналогично

$$\sum_{i=1}^N h_{di}\dot{q}_i = 0,5 \sum_{i=1}^N \dot{q}_i \sum_{j=1}^N H_{jji}\dot{q}_j^2 = 0,5 \sum_{j=1}^N \dot{q}_j^2 \sum_{i=1}^N H_{jji}\dot{q}_i = 0,5 \sum_{j=1}^N \dot{H}_{jj}\dot{q}_j^2.$$

Теперь

$$\sum_{i=1}^N (0,5h_{bi} - h_{di})\dot{q}_i = 0,5 \sum_{i=1}^N \dot{H}_{ii}\dot{q}_i^2 - 0,5 \sum_{j=1}^N \dot{H}_{jj}\dot{q}_j^2 = 0,$$

т. е. выражение $0,5h_{bi} - h_{di}$ входит в формулу вычисления ГИС(i).

Таким образом, $h_i = 0,5h_{bi} + h_{pi} + h_{gi}$, где формула вычисления ГИС имеет вид

$$h_{gi} = h_{ai} - h_{ei} + 0,5h_{bi} - h_{di} = h_{ai} + 0,5h_{bi} - \partial T / \partial q_i,$$

что с учетом обозначений (6) доказывает искомую формулу (5).

Выражение $0,5h_{bi} + h_{pi}$, не входящее в ГИС(i), представим в виде суммы $h_{ci} + h_{oi}$, где h_{ci} – ЦИС, h_{oi} – КИС. Для этого в выражениях h_{bi} , h_{pi} выделим слагаемые с квадратами ОС.

Эти слагаемые составляют ЦИС. Оставшиеся слагаемые составляют КИС. Используя обозначение (6), получим

$$\begin{aligned} 0,5h_{bi} + h_{pi} &= 0,5\dot{H}_{ii}\dot{q}_i + \sum_{j=i+1}^N \dot{H}_{ji}\dot{q}_j = \\ &= 0,5\dot{q}_i \sum_{k=1}^N H_{iik}\dot{q}_k + \sum_{j=i+1}^N \dot{q}_j \sum_{k=1}^N H_{jik}\dot{q}_k = h_{ci} + h_{oi}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} h_{ci} &= 0,5H_{iij}\dot{q}_i^2 + \sum_{j=i+1}^N H_{jij}\dot{q}_j^2, \\ h_{oi} &= 0,5\dot{q}_i \sum_{k=1}^{N/i} H_{iik}\dot{q}_k + \sum_{j=i+1}^N \dot{q}_j \sum_{k=1}^{N/j} H_{jik}\dot{q}_k, \end{aligned}$$

что совпадает с искомыми формулами (2), (3). *Утверждение доказано.*

Рассмотрим древовидные системы тел с открытыми ветвями (ДСТОВ), состоящие из поступательных и вращательных кинематических пар, где в качестве ОК приняты относительные линейные и угловые величины. В ДСТОВ каждое тело имеет несущие и несомые тела. В случае подсистемной нумерации тел ДСТОВ знак суммирования величины a_j по номерам тел, несущих i -е тело, записывается в виде $\sum_{j=i+1}^{N_i} a_j$ и знак суммирования величины a_j по номерам тел, несомых i -м телом, записывается в виде $\sum_{j=i+1}^{N_i} a_j$, где N_i – номер последнего тела i -й подсистемы ДСТОВ [15].

Утверждение 2. УД ДСТОВ с подсистемной нумерацией тел представимы в виде

$$\sum_{j=i+1}^{N_i} H_{ij}\ddot{q}_j + H_{ii}\ddot{q}_i + \sum_{j=i+1}^{N_i} H_{ji}\ddot{q}_j + h_{ci} + h_{oi} + h_{gi} = Q_{gi},$$

где $i = 1, 2, \dots, N$;

$$h_{ci} = \sum_{j=i+1}^{N_i} H_{jij}\dot{q}_j^2 \quad (7)$$

– ЦИС(i), действующая на i -е тело и зависящая от квадратов ОС его несомых тел;

$$h_{oi} = h_{oi}^g + \sum_{j=i+1}^{N_i} \dot{q}_j \sum_{k=i+2}^{N_i/j} H_{jik}\dot{q}_k \quad (8)$$

– КИС(i), действующая на i -е тело и зависящая от произведений разноименных ОС его несомых тел, а также от произведения ОС i -го тела на ОС его несомых тел;

$$h_{gi} = h_{oi}^g + \sum_{j=i+1}^{N_i} \dot{H}_{ij}\dot{q}_j - \partial T / \partial q_i \quad (9)$$

– ГИС(i), действующая на i -е тело и зависящая, во-первых, от квадратов ОС его несущих тел, во-вторых, от произведения ОС i -го тела на ОС его несомых тел, в-третьих, от произведений разноименных ОС его несущих тел на ОС как несущих, так и несомых тел;

$$h_{oi}^g = 0,5\dot{q}_i \sum_{j=i+1}^{N_i} H_{iij}\dot{q}_j \quad (10)$$

– составляющая КИС(i) и ГИС(i), действующая на i -е тело и зависящая от произведения ОС i -го тела на ОС его несомых тел.

Доказательство. Общий вид УД для ДСТОВ получается из формулы (1) путем использования записей сумм по номерам несущих и несомых тел.

В ДСТОВ с подсистемной нумерацией тел H_{jj} зависит от $q_{j+1}, q_{j+2}, \dots, q_{N_j}$, H_{kj} зависит от $q_{j+1}, q_{j+2}, \dots, q_k, q_{k+1}, \dots, q_{N_k}$ и в обозначении H_{kji} индекс i должен быть больше индекса j [15]. Поэтому для ДСТОВ формулы (2), (3) принимают вид:

$$\begin{aligned} h_{ci} &= \sum_{j=i+1}^{N_i} H_{jij}\dot{q}_j^2, \\ h_{oi} &= 0,5\dot{q}_i \sum_{j=i+1}^{N_i} H_{iij}\dot{q}_j + \sum_{j=i+1}^{N_i} \dot{q}_j \sum_{k=i+2}^{N_i/j} H_{jik}\dot{q}_k, \end{aligned}$$

что с учетом обозначения (10) совпадает с формулами (7), (8).

Для ДСТОВ из формулы (5) получим

$$h_{gi} = \sum_{j=i+1}^{N_i} \dot{H}_{ij}\dot{q}_j + 0,5\dot{q}_i \sum_{j=i+1}^{N_i} H_{iij}\dot{q}_j - \partial T / \partial q_i,$$

что с учетом обозначения (10) совпадает с формулой (9). *Утверждение доказано.*

Рассмотрим системы тел с одной открытой ветвью (СТОВ). Для них цепочка тел с номерами $1, 2, \dots, i-1$ является несущей для i -го тела и цепочка тел с номерами $i+2, i+3, \dots, N$ является несомой i -м телом.

Утверждение 3. УД СТОВ представимы в виде

$$\sum_{j=1}^{i-1} H_{ij}\ddot{q}_j + H_{ii}\ddot{q}_i + \sum_{j=i+1}^N H_{ji}\ddot{q}_j + h_{ci} + h_{oi} + h_{gi} = Q_{gi}, \quad (11)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$;

$$h_{ci} = \sum_{j=i+1}^N H_{ji}\dot{q}_j^2; \quad (12)$$

$$h_{oi} = h_{oi}^g + \sum_{j=i+1}^{N-1} \dot{q}_j \sum_{k=j+1}^N (H_{kij} + H_{jik})\dot{q}_k; \quad (13)$$

$$\partial T / \partial q_i = 0, 5 \sum_{j=1}^{i-1} H_{jji}\dot{q}_j^2 + \sum_{j=1}^{i-1} \dot{q}_j \sum_{k=j+1}^N H_{kji}\dot{q}_k; \quad (14)$$

$$h_{gi} = h_{oi}^g + \sum_{j=1}^{i-1} \dot{H}_{ij}\dot{q}_j - \partial T / \partial q_i; \quad (15)$$

$$h_{oi}^g = 0, 5 \dot{H}_{ii}\dot{q}_i = 0, 5 \dot{q}_i \sum_{j=i+1}^N H_{ii}\dot{q}_j; \quad (16)$$

$$h_{cN} = h_{oN} = h_{oN}^g = \partial T / \partial q_1 = 0; \quad h_{o1} = h_{g1} = h_{o1}^g. \quad (17)$$

Доказательство. Для СТОВ элементы H_{kj} МИК, где $k \geq j$, зависят от $q_{j+1}, q_{j+2}, \dots, q_N$ [15]. Следовательно, для СТОВ формулы (7), (9), (10) принимают искомый вид (12), (15), (16).

Для доказательства формулы (13) преобразуем двойную сумму в формуле (3) с учетом структурных свойств СТОВ. Получим

$$\sum_{j=i+1}^N \dot{q}_j \sum_{k=1}^{N/j} H_{jik}\dot{q}_k = \sum_{j=i+1}^N \dot{q}_j (\sum_{k=1}^{j-1} H_{jik}\dot{q}_k + \sum_{k=j+1}^N H_{jik}\dot{q}_k). \quad (18)$$

В первой двойной сумме изменим порядок суммирования по формуле (2) приложения 1 книги [15]. Тогда получим

$$\sum_{j=i+1}^N \dot{q}_j \sum_{k=1}^{j-1} H_{jik}\dot{q}_k = \sum_{k=i+1}^N \dot{q}_k \sum_{j=k+1}^N H_{jik}\dot{q}_j = \sum_{j=i+1}^N \dot{q}_j \sum_{k=j+1}^N H_{kij}\dot{q}_k.$$

Следовательно, формула (18) принимает вид

$$\sum_{j=i+1}^N \dot{q}_j \sum_{k=1}^{N/j} H_{jik}\dot{q}_k = \sum_{j=i+1}^N \dot{q}_j \sum_{k=j+1}^N H_{kij}\dot{q}_k + \sum_{j=i+1}^N \dot{q}_j \sum_{k=j+1}^N H_{jik}\dot{q}_k$$

и формула (3) для СТОВ представляется в искомом виде (13). *Утверждение доказано.*

2. Примеры выписывания ОИС

Рассмотрим примеры выписывания по формулам (11)–(17) УД СТОВ с явно выраженными ЦИС, КИС и ГИС.

В УД используются моменты инерции тел относительно осей их связанных систем координат (ССК). Для сокращения записей будем считать, что ССК i -го тела, т. е. ССК(i), является главной для i -го тела и два осевых момента инерции тела совпадают. Обозначим через I_i^x, I_i^y, I_i^z осевые моменты инерции i -го тела, т. е. I_i^x – момент инерции i -го тела относительно оси $O_i\bar{x}_i$, I_i^y – момент инерции i -го тела относительно оси $O_i\bar{y}_i$, I_i^z – момент инерции i -го тела относительно оси $O_i\bar{z}_i$, где $\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i$ – орты ССК(i), O_i – полюс i -го тела.

Условимся вводить ССК тел так, чтобы в исходном положении СТОВ, т. е. для нулевых значений ОК, оси ССК(i) были параллельны соответствующим осям неподвижной СК, в которой ось абсцисс $O\bar{x}$ направлена горизонтально вправо, ось ординат $O\bar{y}$ направлена вертикально вверх и ось аппликат $O\bar{z}$ – на нас. В кинематических схемах СТОВ тела вращательных кинематических пар будем изображать в исходных относительных положениях, т. е. когда их ОК равны нулю.

Для упрощения процесса выписывания ОИС введем в обращение таблицу ОК (ТОК). Заголовок ТОК содержит обозначения номера строки k и столбца j МИК, на пересечении которых расположен элемент H_{kj} , где $k \geq j$. За числами k и j в порядке возрастания номеров перечислены ОК, от которых зависят элементы МИК, т. е. циклические ОК в ТОК не записываются. Под заголовком проведена двойная горизонтальная линия. ТОК разбита на блоки, которые отделены друг от друга двойной горизонтальной линией. Номер блока равен номеру, который записан в первом столбце. Столбцы k, j отделены от столбцов ОК двойной вертикальной линией.

ТОК заполняется по следующим правилам.

1. Если цифра в столбце j последней строки k -го блока равна k , то индикаторы 0 или 1 в следующих столбцах указывают на зависимость (индикатор равен 1) или независимость (индикатор равен 0) от соответствующей ОК диагонального элемента H_{kk} .

2. Если первые две цифры строки равны k, j , то следующие за ними индикаторы 0 или 1 указывают на зависимость (1) или независимость (0) элемента H_{kj} от соответствующей ОК.

3. Если элементы H_{kj} постоянны, где $k \geq j$, то строка с первыми двумя числами k и j в ТОК отсутствует.

Каждый пример начинается с рисунка, на котором представлены кинематическая схема манипулятора (далее – схема), его МИК и ТОК. Схема и МИК взяты из примеров 1–6 книги [15]. На схеме изображены положения полюсов тел, каждое из которых является началом ССК тела, и положения центров масс (ЦМ) тел – в виде крестиков. В записи элементов МИК и в основном тексте используются следующие обозначения:

$a_i = m_{oi}|\overline{O_i C_i}|$, где m_{oi} – масса i -го тела, $\overline{O_i C_i}$ – радиус-вектор, проведенный из полюса i -го тела в его ЦМ;

m_i – масса i -й подсистемы, т. е. тел с номерами $i, i + 1, \dots, N$;

\overline{q}_i – орт оси вращения $O_i \overline{q}_i$ i -го тела;

\overline{p}_i – орт оси $O_i \overline{p}_i$ поступательного движения i -го тела относительно предшествующего тела;

$s_i = \sin(q_i)$; $c_i = \cos(q_i)$.

Здесь и далее для сокращения записи МИК опускается ее обозначение H , а вместо ненулевых наддиагональных элементов записываются их обозначения.

Аббревиатуру МС в примерах следует трактовать как манипуляционная система робота.

Пример 1. МС с полярной СК в вертикальной плоскости на рис. 1. Для этой МС имеем:

$N = 2$; $\overline{q}_1 = \overline{z}$; $\overline{p}_2 = \overline{x}_2 = \overline{x}_1$; $q_2 = O_1 O_2$;

масса m_{oi} ($i = 1, 2$) распределена симметрично оси $O_i \overline{x}_i$.

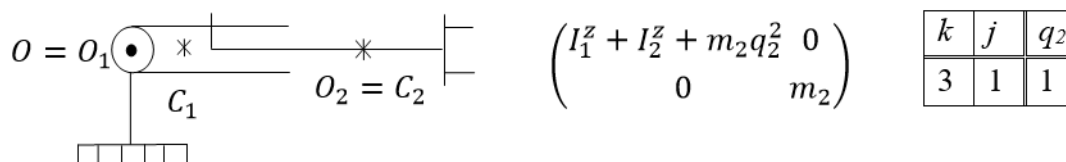


Рис. 1. Механическая система с полярной системой координат
Fig. 1. Mechanical system with polar coordinate system

По формулам (17) имеем:

$$h_{c2} = h_{o2} = h_{o2}^g = \partial T / \partial q_1 = 0, \quad h_{o1} = h_{g1} = h_{o1}^g.$$

Для $i = 1$ по формулам (12), (16) и ТОК выпишем

$$h_{c1} = H_{212} \dot{q}_2^2 = 0, \quad h_{o1}^g = 0,5 \dot{q}_1 H_{112} \dot{q}_2,$$

где с учетом выражения H_{11} имеем $H_{112} = 2m_2 q_2$.

Для $i = 2$ по формуле (14) выпишем

$$\partial T / \partial q_2 = 0,5 H_{112} \dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 H_{212} \dot{q}_2 = m_2 q_2 \dot{q}_1^2.$$

Следовательно, по формуле (15) получим

$$h_{g2} = \dot{H}_{21} \dot{q}_1 - \partial T / \partial q_2 = -m_2 q_2 \dot{q}_1^2.$$

Таким образом, УД МС на рис. 1 с выделенными ГИС имеют следующий вид:

$$\begin{cases} (I_1^z + I_2^z + m_2 q_2^2) \ddot{q}_1 + 2h_{g1} = Q_{g1}, \\ m_2 \ddot{q}_2 + h_{g2} = Q_{g2}, \end{cases}$$

где $h_{g1} = m_2 q_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2$, $h_{g2} = -m_2 q_2 \dot{q}_1^2$. Действительно, по определению Тэта

$$h_{g1} \dot{q}_1 + h_{g2} \dot{q}_2 = m_2 q_2 \dot{q}_1^2 \dot{q}_2 - m_2 q_2 \dot{q}_1^2 \dot{q}_2 = 0.$$

Пример 2. МС с декартовой СК в вертикальной плоскости на рис. 2. Для этой МС имеем:

$N = 3$; $\overline{p}_1 = \overline{y}$; $\overline{p}_2 = \overline{x}$; $\overline{q}_3 = \overline{z}$; $q_1 = O O_1$; $q_2 = O_1 O_2$;

масса m_{o3} распределена симметрично оси $O_3 \overline{x}_3$.

По формулам (17) имеем:

$$h_{c3} = h_{o3} = h_{o3}^g = \partial T / \partial q_1 = 0, \quad h_{o1} = h_{g1} = h_{o1}^g.$$

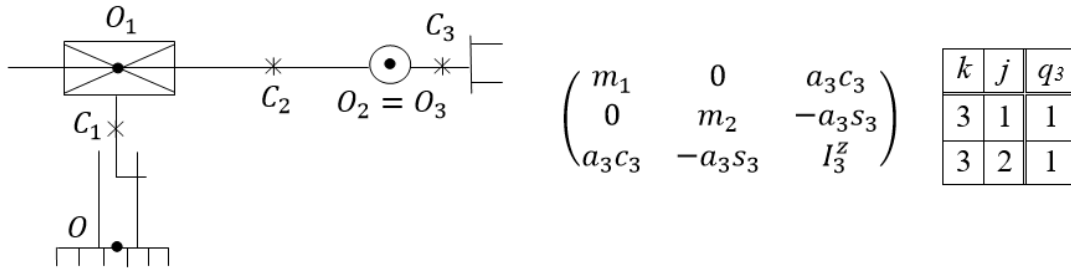


Рис. 2. Механическая система с декартовой системой координат
Fig. 2. Mechanical system with Cartesian coordinate system

Для $i = 1$ по формулам (12), (16) и ТОК выпишем

$$h_{c1} = H_{212} \dot{q}_2^2 + H_{313} \dot{q}_3^2 = H_{313} \dot{q}_3^2,$$

$$h_{o1}^g = 0,5 \dot{q}_1 (H_{112} \dot{q}_2 + H_{113} \dot{q}_3) = h_{g1} = 0,$$

где с учетом выражения H_{31} имеем $H_{313} = -a_3 s_3$.

Для $i = 2$ по формулам (12), (16), ТОК и элементам МИК выпишем

$$h_{c2} = H_{323} \dot{q}_3^2 = -a_3 c_3 \dot{q}_3^2,$$

$$h_{o2}^g = 0,5 \dot{q}_2 H_{222} \dot{q}_2 = 0, \quad h_{o2} = \partial T / \partial q_2 = 0, \quad h_{g2} = 0.$$

Согласно определению Тэта, если $N = 3$ и $h_{g1} = h_{g2} = 0$, то $h_{g3} = 0$.

Таким образом, в МС на рис. 2 ГИС отсутствуют и УД имеют вид

$$\begin{cases} m_1 \ddot{q}_1 + H_{31} \ddot{q}_3 + H_{32} \dot{q}_3^2 = Q_{g1}, \\ m_2 \ddot{q}_2 + H_{32} \ddot{q}_3 - H_{31} \dot{q}_3^2 = Q_{g2}, \\ H_{31} \ddot{q}_1 + H_{32} \ddot{q}_2 + I_3^z \ddot{q}_3 = Q_{g3}. \end{cases}$$

Пример 3. МС с цилиндрической СК на рис. 3 ($N = 3$). Для этой МС имеем:

$$N = 3; \quad \bar{q}_1 = \bar{y}; \quad \bar{p}_2 = \bar{x}_1; \quad \bar{p}_3 = -\bar{y}; \quad q_2 = O_1 O_2; \quad q_3 = O_2 O_3;$$

массы m_{oi} (для $i = 1$ и $i = 3$) распределены симметрично осям $O_i \bar{y}_i$;

масса m_{o2} распределена симметрично оси $O_2 \bar{x}_2$.

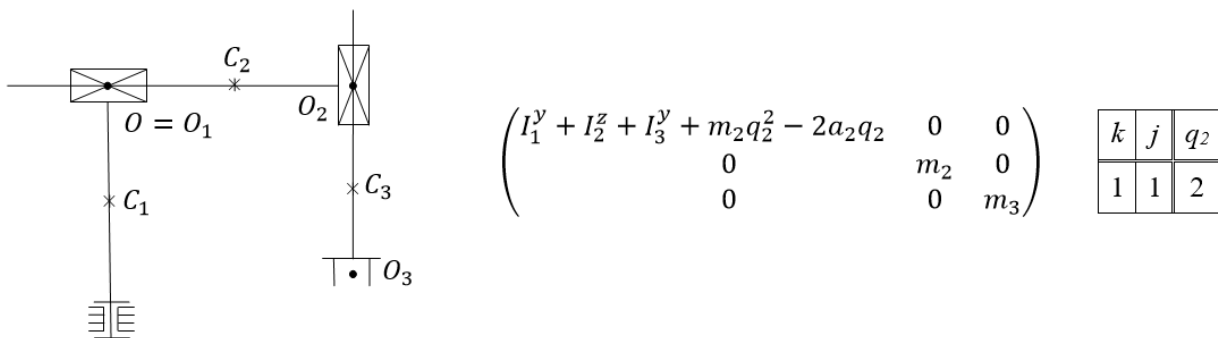


Рис. 3. Цилиндрическая механическая система ($N = 3$)
Fig. 3. Cylindrical mechanical system ($N = 3$)

По формулам (17) имеем

$$h_{c3} = h_{o3} = h_{o3}^g = \partial T / \partial q_1 = 0, \quad h_{o1} = h_{g1} = h_{o1}^g.$$

Для $i = 1$ по формулам (12), (16) и ТОК выпишем

$$h_{c1} = H_{212} \dot{q}_2^2 + H_{313} \dot{q}_3^2 = 0, \quad h_{o1}^g = 0,5 \dot{q}_1 H_{112} \dot{q}_2.$$

С учетом выражения H_{11} имеем

$$H_{112} = 2m_2 q_2 - 2a_2 = 2m_{q2}, \quad \text{где } m_{q2} = m_2 q_2 - a_2.$$

Для $i = 2$ по формулам (12), (16) и ТОК выпишем

$$h_{c2} = H_{323} \dot{q}_3^2 = 0, \quad h_{o2}^g = 0,5 \dot{q}_2 H_{223} \dot{q}_3 = 0.$$

По формуле (14) выпишем

$$\partial T / \partial q_2 = 0,5H_{112}\dot{q}_1^2 = m_{q2}\dot{q}_1^2, h_{g2} = -\partial T / \partial q_2 = -m_{q2}\dot{q}_1^2.$$

Таким образом, УД МС на рис. 3 с выделенными ГИС имеют следующий вид:

$$\begin{cases} (I_1^y + I_2^z + I_3^y + m_2q_2^2 - 2a_2q_2)\ddot{q}_1 + 2h_{g1} = Q_{g1}, \\ m_2\ddot{q}_2 + h_{g2} = Q_{g2}, \\ m_3\ddot{q}_3 = Q_{g3}, \end{cases}$$

где $h_{g1} = m_{q2}\dot{q}_1\dot{q}_2$, $h_{g2} = -m_{q2}\dot{q}_1^2$. Действительно,

$$h_{g1}\dot{q}_1 + h_{g2}\dot{q}_2 = m_{q2}\dot{q}_1^2\dot{q}_2 - m_{q2}\dot{q}_1^2\dot{q}_2 = 0.$$

Пример 4. МС с цилиндрической СК на рис. 4 ($N = 4$). Для этой МС имеем:

$$N = 4; \bar{q}_1 = \bar{y}; \bar{p}_2 = \bar{y}; \bar{p}_3 = \bar{x}_1; \bar{q}_4 = \bar{z}_4 = \bar{z}_1; q_2 = O_1O_2; q_3 = O_2O_3;$$

массы m_{oi} ($i = 1, 2$) распределены симметрично осям $O_i\bar{y}_i$;

массы m_{oj} ($j = 3, 4$) распределены симметрично осям $O_j\bar{x}_j$.

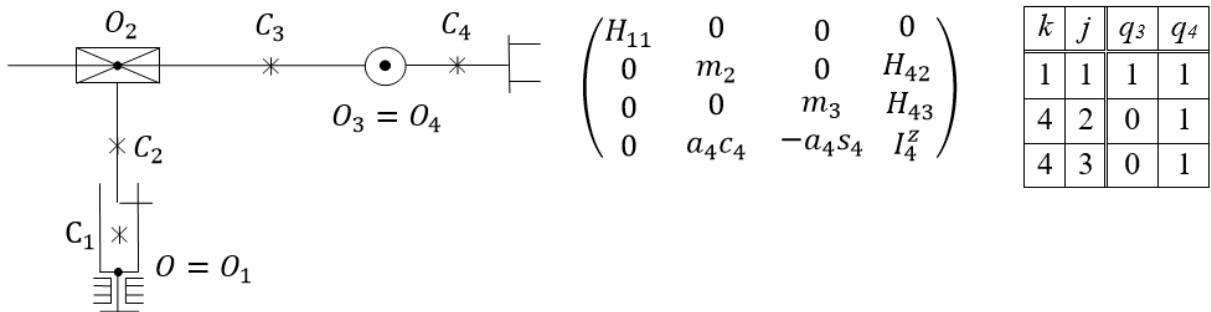


Рис. 4. Цилиндрическая механическая система ($N = 4$)
Fig. 4. Cylindrical mechanical system ($N = 4$)

По формулам (17) имеем

$$h_{c4} = h_{o4} = h_{o4}^g = \partial T / \partial q_1 = 0, h_{o1} = h_{g1} = h_{o1}^g.$$

Для $i = 1$ по формулам (12), (16) и ТОК выпишем

$$h_{c1} = 0, h_{o1}^g = 0,5\dot{q}_1(H_{113}\dot{q}_3 + H_{114}\dot{q}_4).$$

Используя МИК, получим

$$H_{113} = 2(m_3q_3 + a_4c_4 - a_3) = 2h_q,$$

$$H_{114} = 2q_3(-a_4s_4) - 2(I_4^z - I_4^x)c_4s_4 = -2I_q,$$

где $h_q = m_3q_3 + a_4c_4 - a_3$, $I_q = [a_4q_3 + (I_4^z - I_4^x)c_4]s_4$. Следовательно,

$$h_{o1}^g = (h_q\dot{q}_3 - I_q\dot{q}_4)\dot{q}_1.$$

Для $i = 2$ по формулам (12)–(16), ТОК и МИК выпишем

$$h_{c2} = H_{323}\dot{q}_3^2 + H_{424}\dot{q}_4^2 = -a_4s_4\dot{q}_4^2,$$

$$h_{o2}^g = 0, h_{o2} = 0, \partial T / \partial q_2 = h_{g2} = 0.$$

Для $i = 3$ по формулам (12)–(16), ТОК и МИК выпишем

$$h_{c3} = H_{434}\dot{q}_4^2 = -a_4c_4\dot{q}_4^2, h_{o3} = 0, h_{o3}^g = 0,$$

$$\partial T / \partial q_3 = 0,5H_{113}\dot{q}_1^2 = h_q\dot{q}_1^2, h_{g3} = -\partial T / \partial q_3 = -h_q\dot{q}_1^2.$$

Для $i = 4$ по формулам (14), (15) выпишем

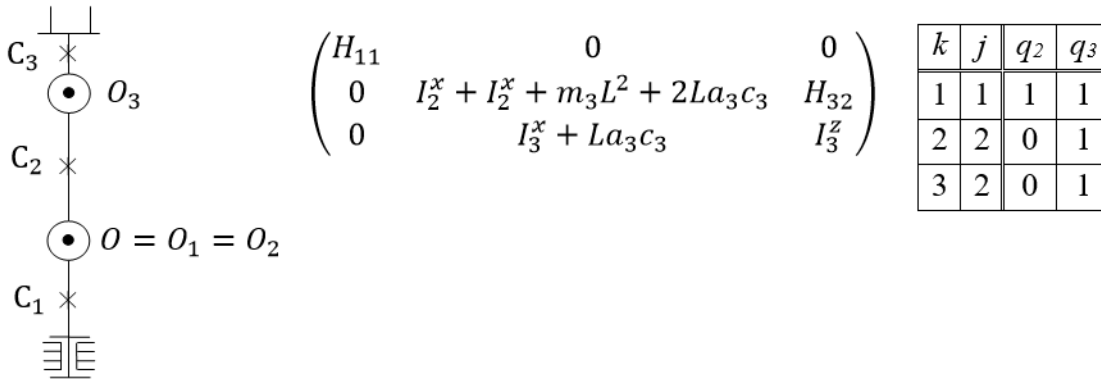
$$\partial T / \partial q_4 = 0,5H_{114}\dot{q}_1^2 = -I_q\dot{q}_1^2, h_{g4} = -\partial T / \partial q_4 = I_q\dot{q}_1^2.$$

Таким образом, УД МС на рис. 4 с выделенными ГИС имеют следующий вид:

$$\begin{cases} J_1^q \ddot{q}_1 + 2h_{g1} = Q_{g1}, \\ m_2 \ddot{q}_2 + H_{42} \ddot{q}_4 + H_{43} \dot{q}_4^2 = Q_{g2}, \\ m_3 \dot{q}_3 + H_{43} \ddot{q}_4 - H_{42} \dot{q}_4^2 + h_{g3} = Q_{g3}, \\ H_{42} \ddot{q}_2 + H_{43} \dot{q}_3 + I_4^z \ddot{q}_4 + h_{g4} = Q_{g4}, \end{cases}$$

где $h_{g1} = h_q \dot{q}_1 \dot{q}_3 - I_q \dot{q}_1 \dot{q}_4$; $h_{g3} = -h_q \dot{q}_1^2$; $h_{g4} = I_q \dot{q}_1^2$. Очевидно, что $h_{g1} \dot{q}_1 + h_{g3} \dot{q}_3 + h_{g4} \dot{q}_4 = 0$.

Пример 5. Ангулярная МС на рис. 5 ($N = 3$). Для этой МС имеем: $N = 3$; $\bar{q}_1 = \bar{y}$; $\bar{q}_2 = \bar{q}_3 = \bar{z}_1$; $L = O_2 O_3$; $c_{23} = \cos(q_2 + q_3)$; массы m_{oi} ($i = 1, 2, 3$) распределены симметрично осям $O_i \bar{y}_i$.



$$H_{11} = H_{22} + I_2^y + (I_2^y - I_2^x - m_3 L^2) c_2^2 + (I_3^y - I_3^x) c_{23}^2 - 2La_3 c_2 c_{23}$$

Рис. 5. Ангулярная механическая система ($N = 3$)
Fig. 5. Angular mechanical system ($N = 3$)

По формулам (17) имеем

$$h_{c3} = h_{o3} = h_{o3}^g = \partial T / \partial q_1 = 0, \quad h_{o1} = h_{g1} = h_{o1}^g.$$

Для $i = 1$ по формулам (12), (16) и ТОК выпишем

$$h_{c1} = 0, \quad h_{o1}^g = 0,5 \dot{q}_1 (H_{112} \dot{q}_2 + H_{113} \dot{q}_3).$$

Для $i = 2$ по формулам (12)–(16), ТОК и МИК выпишем

$$h_{c2} = H_{323} \dot{q}_3^2 = -La_3 s_3 \dot{q}_3^2, \quad h_{o2}^g = 0,5 \dot{q}_2 H_{223} \dot{q}_3 = -La_3 s_3 \dot{q}_2 \dot{q}_3,$$

$$h_{o2} = h_{o2}^g, \quad \partial T / \partial q_2 = 0,5 H_{112} \dot{q}_1^2,$$

$$h_{g2} = h_{o2}^g - \partial T / \partial q_2 = 0,5 (H_{223} \dot{q}_2) \dot{q}_3 - H_{112} \dot{q}_1^2.$$

Для $i = 3$ по формулам (14) и (15) выпишем

$$\partial T / \partial q_3 = 0,5 (H_{113} \dot{q}_1^2 + H_{223} \dot{q}_2^2) + \dot{q}_2 H_{323} \dot{q}_3,$$

$$h_{g3} = \dot{H}_{31} \dot{q}_1 + \dot{H}_{32} \dot{q}_2 - \frac{\partial T}{\partial q_3} = H_{323} \dot{q}_2 \dot{q}_3 - 0,5 (H_{113} \dot{q}_1^2 + H_{223} \dot{q}_2^2) - \dot{q}_2 H_{323} \dot{q}_3.$$

Таким образом, УД МС на рис. 5 с выделенными ГИС имеют следующий вид:

$$\begin{cases} H_{11} \ddot{q}_1 + 2h_{g1} = Q_{g1}, \\ H_{22} \ddot{q}_2 + H_{32} \ddot{q}_3 - La_3 s_3 \dot{q}_3^2 - La_3 s_3 \dot{q}_2 \dot{q}_3 + h_{g2} = Q_{g2}, \\ H_{32} \ddot{q}_2 + I_3^z \ddot{q}_3 + h_{g3} = Q_{g3}. \end{cases}$$

Вычислим мощность ГИС. Получим

$$h_{g1} \dot{q}_1 + h_{g2} \dot{q}_2 + h_{g3} \dot{q}_3 = 0,5 \dot{q}_1 (H_{112} \dot{q}_2 + H_{113} \dot{q}_3) \dot{q}_1 + 0,5 (H_{223} \dot{q}_2 \dot{q}_3 - H_{112} \dot{q}_1^2) \dot{q}_2 - 0,5 (H_{113} \dot{q}_1^2 + H_{223} \dot{q}_2^2) \dot{q}_3 = 0.$$

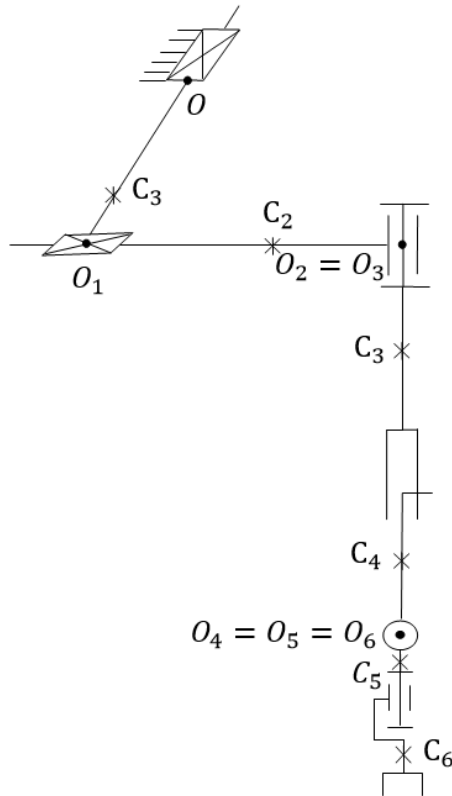
Пример 6. Универсальная МС с декартовой СК (рис. 6). Для этой МС имеем:

$$N = 6; \bar{p}_1 = \bar{z}; \bar{p}_2 = \bar{x}; \bar{q}_3 = \bar{y}; \bar{p}_4 = -\bar{y};$$

$$\bar{q}_5 = \bar{z}_5; \bar{q}_6 = \bar{z}_6; q_1 = 0O_1; q_2 = O_1O_2; q_4 = O_3O_4;$$

массы m_{oi} ($i = 3, 4, 5, 6$) распределены симметрично осям $O_i\bar{y}_i$. В МИК использованы следующие обозначения:

$$a = a_5 + a_6; A = I_3^y + I_4^y + I_5^x + I_6^x; B = I_5^x - I_5^y + I_6^x - I_6^y.$$



$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 & H_{31} & 0 & H_{51} & 0 \\ 0 & m_2 & H_{32} & 0 & H_{52} & 0 \\ -ac_3s_5 & -as_3s_5 & A - Bc_5^2 & 0 & 0 & H_{63} \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & H_{54} & 0 \\ -as_3c_5 & ac_3s_5 & 0 & -as_5 & I_5^x + I_6^x & 0 \\ 0 & 0 & I_6^y c_5 & 0 & 0 & I_6^y \end{pmatrix}$$

k	j	q_3	q_5
3	1	1	1
3	2	1	1
3	3	0	1
5	1	1	1
5	2	1	1
5	4	0	1
6	3	0	1

Рис. 6. Механическая система с декартовой системой координат
Fig. 6. Mechanical system with Cartesian coordinate system

По формулам (17) имеем

$$h_{c6} = h_{o6} = h_{o6}^g = \partial T / \partial q_1 = 0, h_{o1} = h_{g1} = h_{o1}^g.$$

Для $i = 1$ по формуле (12) на основе ТОК выпишем отличные от нуля ЦИС. Получим

$$h_{c1} = H_{313}\dot{q}_3^2 + H_{515}\dot{q}_5^2, h_{c2} = H_{323}\dot{q}_3^2 + H_{525}\dot{q}_5^2, h_{c4} = H_{545}\dot{q}_5^2.$$

По формуле (16) на основе ТОК выпишем

$$h_{o3}^g = 0,5\dot{q}_3 H_{335}\dot{q}_5.$$

По формуле (13) на основе ТОК выпишем отличные от нуля КИС. Получим

$$h_{o1} = \dot{q}_3(H_{513} + H_{315})\dot{q}_5, h_{o2} = \dot{q}_3(H_{523} + H_{325})\dot{q}_5,$$

$$h_{o3} = h_{o3}^g + \dot{q}_5 H_{635}\dot{q}_6.$$

По формуле (15) на основе ТОК выпишем отличные от нуля ГИС. Получим

$$h_{g3} = h_{o3}^g + \dot{q}_1(H_{313}\dot{q}_3 + H_{315}\dot{q}_5) + \dot{q}_2(H_{323}\dot{q}_3 + H_{325}\dot{q}_5) - \partial T / \partial q_3,$$

$$h_{g5} = \dot{q}_1(H_{513}\dot{q}_3 + H_{515}\dot{q}_5) + \dot{q}_2(H_{523}\dot{q}_3 + H_{525}\dot{q}_5) + \dot{q}_4 H_{545}\dot{q}_5 - \partial T / \partial q_5,$$

$$h_{g6} = \dot{q}_3 H_{635}\dot{q}_5.$$

Таким образом, УД МС на рис. 6 с выделенными ГИС имеют следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \ddot{q}_1 - ac_3 s_5 \ddot{q}_3 - as_3 c_5 \ddot{q}_5 + a[s_3 s_5 (\dot{q}_3^2 + \dot{q}_5^2) - 2c_3 c_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5] = Q_{g1}, \\ m_2 \ddot{q}_2 - as_3 s_5 \ddot{q}_3 + ac_3 c_5 \ddot{q}_5 - a[c_3 s_5 (\dot{q}_3^2 + \dot{q}_5^2) + 2s_3 c_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5] = Q_{g2}, \\ -ac_3 s_5 \ddot{q}_1 - as_3 c_5 \ddot{q}_2 + (A - Bc_5^2) \ddot{q}_3 + I_6^y c_5 \ddot{q}_6 + Bs_5 c_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5 + h_{g3} = Q_{g3}, \\ m_4 \ddot{q}_4 - as_5 \ddot{q}_5 - ac_5 \dot{q}_5^2 = Q_{g4}, \\ -as_3 c_5 \ddot{q}_1 + ac_3 c_5 \ddot{q}_2 - as_5 \ddot{q}_4 + (I_5^x + I_6^x) \ddot{q}_5 + h_{g5} = Q_{g5}, \\ I_6^y c_5 \ddot{q}_3 + I_6^y \ddot{q}_6 - I_6^y s_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5 = Q_{g6}, \end{array} \right.$$

где $h_{g3} = I_b c_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5 - I_6^y s_5 \dot{q}_5 \dot{q}_6$, $h_{g5} = I_6^y s_5 \dot{q}_3 \dot{q}_6 - I_b s_5 c_5 \dot{q}_3^2$, $h_{g6} = \dot{q}_3 H_{635} \dot{q}_5$.

ОИС принимают вид

$$h_1 = a[s_3 s_5 (\dot{q}_3^2 + \dot{q}_5^2) - 2c_3 c_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5],$$

$$h_2 = -a[c_3 s_5 (\dot{q}_3^2 + \dot{q}_5^2) + 2s_3 c_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5],$$

$$h_3 = (2I_b c_5 \dot{q}_3 - I_6^y \dot{q}_6) s_5 \dot{q}_5, h_4 = -ac_5 \dot{q}_5 \dot{q}_5, h_5 = (I_6^y \dot{q}_6 - I_b c_5 \dot{q}_3) s_5 \dot{q}_3,$$

$$h_6 = -I_6^y s_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5.$$

Заключение

Описанные формализмы позволяют выделять ОИС в произвольных механических системах. Особое значение имеет выделение ГИС, так как их мощность равна нулю, что упрощает решение ряда задач, связанных с вычислением работы, установочной и потребляемой мощности приводов, а также оптимальным управлением в смысле минимизации энергозатрат на реализацию программных движений управляемых систем тел.

Список литературы/References

- Lewis F.L., Dawson D.M., Abdallah C.T. *Robot Manipulator Control: Theory and Practice*. Marcel Dekker, Inc., New York; 2004. P. 110–118.
- Kayacan, Erkan; Kayacan, Erdal; Ramon, Herman; Saeys, Wouter. Velocity Control of a Spherical Rolling Robot Using a Grey-PID Type Fuzzy Controller with an Adaptive Step Size. In: *10th IFAC Symposium on Robot Control International Federation of Automatic Control. Dubrovnik, Croatia, September 5–7, 2012*; 2012. P. 863–868. DOI: 10.3182/20120905-3-HR-2030.00123
- Sadati S.M.H., Naghibi S.E., Naraghi M. An Automatic Algorithm to Derive Linear Vector Form of Lagrangian Equation of Motion with Collision and Constraint. *Procedia Computer Science*. 2015;76:217–222. DOI: 10.1016/j.procs.2015.12.345
- Ghaleb N.M., Aly A.A. Modeling and Control of 2-DOF Robot Arm. *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*. 2018;6(11):24–31.
- Amin A.T.M., Ab Rahim A.H., Low C.Y. Adaptive controller algorithm for 2-DOF humanoid robot arm. *Procedia Technology*. 2014;15:765–774. DOI: 10.1016/j.protcy.2014.09.049
- Korayem M.H., Shafei A.M., Shafei H.R. Dynamic modeling of nonholonomic wheeled mobile manipulators with elastic joints using recursive Gibbs–Appell formulation. *Scientia Iranica*. 2012;19(4):1092–1104. DOI: 10.1016/j.scient.2012.05.001
- Delavari H., Ghaderi R., Ranjbar N.A., HosseinNia S.H., Momani S. Adaptive Fractional PID Controller for Robot Manipulator. In: *Proceedings of FDA'10. The 4th IFAC Workshop Fractional Differentiation and its Applications. Badajoz, Spain, October 18–20, 2010*; 2010. P. 1–7.
- Jafarov E.M., Istefanopulos Y., Parlakçi M.N.A. A new variable structure PID-controller for robot manipulators with parameter perturbations: an augmented sliding surface approach. In: *15th Triennial World Congress. Barcelona, Spain, 2002*. P. 365–370.
- JianXuandLeiQi. Robust Adaptive PID Control of Robot Manipulator with Bounded Disturbances. *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*. 2013;2013:1–13. DOI: 10.1155/2013/535437
- Chunqing H., Songjiao Sh. PID feedback for mixed H_2/H_∞ tracking control of robotic manipulators. *Journal of Systems Engineering and Electronics*. 2004;15(4):579–585.
- Elshabasy M.M.Y.B., Mohamed K.T., Ata A.A. Power optimization of planar redundant manipulator moving along constrained-end trajectory using hybrid techniques. *Alexandria Engineering Journal*. 2017;56(4):439–447.

12. Hošovský A., Pítel' J., Židek K., Tóthová M., Sárosi J., Cveticanin L. Dynamic characterization and simulation of two-link soft robot arm with pneumatic muscles. *Mechanism and Machine Theory*. 2016;103:98–116. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.04.013
13. Shala A., Likaj R., Bruqi M., Bajrami X. Propulsion Effect Analysis of 3Dof Robot under Gravity. *Procedia Engineering*. 2015;100:206–212. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.359
14. Fontes J.V., da Silva M.M. On the dynamic performance of parallel kinematic manipulators with actuation and kinematic redundancies. *Mechanism and Machine Theory*. 2016;103:148–166. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.004
15. Телегин А.И. Основы теоретической механики систем тел. С приложениями в робототехнике: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2023. 252 с. [Telegin A.I. *Osnovy teoreticheskoy mekhaniki sistem tel. S prilozheniyami v robototekhnike: ucheb. posobie dlya vuzov* [Fundamentals of Theoretical Mechanics of Body Systems. With applications in robotics: textbook for universities]. St. Petersburg: Lan'; 2023. 252 p. (In Russ.)]
16. Lur'e A.I. *Analiticheskaya mekhanika* [Lur'e A.I. [Analytical Mechanics]]. Moscow: Fizmatgiz; 1961. 824 p. (In Russ.)]

Информация об авторе

Телегин Александр Иванович, д-р физ.-мат. наук, проф., проф. кафедры автоматизации, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, Миасс, Россия; teleginai@susu.ru.

Information about the author

Aleksandr I. Telegin, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Prof. of the Department of Automation, South Ural State University, Miass, Russia; teleginai@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 09.06.2023

The article was submitted 09.06.2023

Управление в социально-экономических системах Control in social and economic systems

Научная статья
УДК 65.012
DOI: 10.14529/ctcr240107

СОВРЕМЕННАЯ ПАЛИТРА УПРАВЛЕНЧЕСКИХ СРЕДСТВ И МЕХАНИЗМОВ ЭФФЕКТИВНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

А.Р. Вагнер¹, admin@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6049-2121>

А.В. Голлай¹, alexander@hollay.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5070-6779>

К.А. Коренная², kkris221@mail.ru

О.В. Логиновский¹, loginovskiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

А.А. Максимов³, <https://orcid.org/0000-0002-1476-0663>

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² АО «Кузнецкие ферросплавы», Новокузнецк, Россия

³ Государственная Дума Федерального Собрания Российской Федерации VIII созыва, Москва, Россия

Аннотация. В статье рассмотрена динамика разнообразных управленческих подходов, средств, методов и механизмов, используемых в организационных системах в процессе анализа деятельности предприятий и организаций для формирования адекватных управленческих решений руководителями компаний различных видов деятельности. Показано, что в современную «палитру» актуальных способов, приемов и иных средств управления эффективного руководителя кроме разнородных менеджерских технологий должны входить новейшие методы и модели, создаваемые в рамках автоматизированных систем управления компаниями с использованием средств цифровизации, цифровой трансформации, применения цифровых двойников и др. **Цель работы** состоит в разработке целостного комплекса управленческих средств, методов и механизмов, которыми обязан владеть эффективный руководитель в процессе подготовки и принятия управленческих решений, а затем их реализации и контроля достигнутых результатов. **Материалы и методы.** Выполненный в статье обобщенный анализ управленческих подходов, средств, технологий и механизмов улучшения работы организационных систем базируется на значительном объеме, представленном в научно-технической литературе материалов. **Результаты,** полученные авторами, состоят в разработке целостного комплекса основных средств и механизмов, которые необходимо использовать в процессе формирования и принятия управленческих решений в организационных системах. **Заключение.** В статье всесторонне обосновано, что современная управленческая «палитра» эффективного руководителя должна содержать комплекс разнообразных подходов, приемов, методов и механизмов управления всеми процессами и направлениями деятельности различных предприятий и организаций, включая применение автоматизированных систем управления, средств цифровизации и цифровой трансформации, а также внедрение в практику совершенствования работы организационных систем цифровых двойников.

Ключевые слова: средства управления организационными системами, менеджерские приемы, механизмы управления, цифровизация, цифровая трансформация, цифровой двойник, подходы к управлению

Для цитирования: Современная палитра управленческих средств и механизмов эффективного руководителя / А.Р. Вагнер, А.В. Голлай, К.А. Коренная и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 1. С. 75–86. DOI: 10.14529/ctcr240107

Original article
DOI: 10.14529/ctcr240107

EFFECTIVE LEADER'S MODERN MANAGEMENT TOOLS AND MECHANISMS

A.R. Wagner¹, admin@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6049-2121>

A.V. Hollay¹, alexander@hollay.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5070-6779>

K.A. Korennaya², kkris221@mail.ru

O.V. Loginovskiy¹, loginovskiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

A.A. Maksimov³, <https://orcid.org/0000-0002-1476-0663>

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² JSC "Kuznetsk Ferroalloys", Novokuznetsk, Russia

³ State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation of the VIII convocation, Moscow, Russia

Abstract. The article considers the dynamics of various managerial approaches, means, methods and mechanisms used in organisational systems in the process of analysis of the activity of enterprises and organisations in order to form adequate managerial decisions by managers of companies of various types of activity. It is shown that the modern "palette" of actual methods, techniques and other means of management of an effective manager, in addition to heterogeneous managerial technologies, should include the latest methods and models created within the framework of automated systems of company management using the means of digitalisation, digital transformation, application of digital twins et al. **Aim.** The aim of this work is to create a comprehensive set of managerial tools, methods, and mechanisms that an effective manager should possess when preparing, adopting, implementing, and controlling managerial decisions and their outcomes. **Materials and methods.** The article presents a comprehensive analysis of managerial approaches, means, technologies, and mechanisms aimed at enhancing the performance of organizational systems. The analysis is based on a significant amount of scientific and technical literature. **Results.** The authors have developed a series of holistic tools and mechanisms to be used in the process of forming and adopting managerial decisions in organisational systems. **Conclusion.** The article argues that an effective manager should possess a diverse set of approaches, techniques, methods, and mechanisms to manage all processes and areas of activity in various enterprises and organizations. This includes the use of automated management systems, digitalization, and digital transformation, as well as the introduction of digital twins to improve organizational systems.

Keywords: organisational systems management tools, managerial techniques, management mechanisms, digitalisation, digital transformation, digital twin, management approaches

For citation: Wagner A.R., Hollay A.V., Korennaya K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. Effective leader's modern management tools and mechanisms. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(1):75–86. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240107

Введение

Когда-то, теперь уже в весьма отдаленном прошлом, один из основоположников современного менеджмента – знаменитый Анри Файоль – сформулировал состав основных положений или нот менеджмента: разделение труда; полномочия и ответственность; дисциплина; единоначалие; единство направления; подчиненность личных интересов общим; вознаграждение персонала; централизация; скалярная цепь; порядок; справедливость; стабильность рабочего места для персонала; инициатива; корпоративный дух.

Как известно, уже в начале XX века многие руководители предприятий и организаций начали осознавать, что управление становится важнейшей составляющей обеспечения успешной деятельности. Именно с этого времени оно также становится и широко изучаемой областью знаний.

Еще несколько лет назад [1] авторы данной статьи акцентировали внимание на том, что управление представляет собой организацию процессов и событий, обеспечивающую достижение определенных целей и решение поставленных задач по всем без исключения направлениям и видам деятельности предприятий или организаций. При этом важно осознавать, что для организации бизнеса характерно следующее:

- распределение должностей в компаниях и корпорациях должно осуществляться на основе компетентности и результатов деятельности работников;
- структура управления в предприятиях и организациях должна учитывать возможности делегирования полномочий;
- выработка вариантов управленческих решений должна производиться на основе системы критериев;
- подготовка и принятие управленческих решений должны иметь возможность учета коллегиального мнения соответствующих управленческих звеньев в руководстве компаний;
- управленческие процедуры в компаниях и корпорациях должны учитывать разграничения управленческих функций, а также различие между управленческой и неуправленческой деятельностью;
- необходимо выделить способных и ответственных за прием тактических управленческих решений лиц в соответствующие отдельные категории.

Следует отметить, что владельцы предприятий и корпораций вплоть до начала XX века даже не пытались рассматривать вопросы совершенствования управления своими компаниями, а стремились улучшить работу в них лишь за счет производственной составляющей, включая использование новых станков и механизмов.

Таким образом, интереса к вопросам повышения эффективности управления организациями в те годы, по сути, не было. Он появился лишь после возникновения новых подходов и школ управления, к которым относятся школа научного управления, классическая или административная школа, школа управления на основе человеческих отношений, школа поведенческих наук, школа количественного анализа, а также процессный, системный и ситуационный подходы к управлению.

Сущность и содержание перечисленных подходов, а также других менее значимых подходов и принципов управления, подробно рассмотрены, например, в [1].

Полезно перечислить также наиболее значимые принципы управления, которые тесно пересекаются с уже упоминавшимися нотами менеджмента:

- принцип рационального распределения прав, обязанностей и функций в системе управления;
- принцип оптимального сочетания централизации и децентрализации управленческих воздействий;
- принцип обеспечения общих интересов работников компании, участвующих своими капиталами в финансовом основании фирмы;
- принцип подчиненности разнообразных интересов и функций, возникающих внутри компании, ее основным целям и задачам;
- принцип необходимости учета происходящих ситуационных изменений как внутри, так и вне организации, а также появления новых промышленных и информационных технологий, материалов и ресурсов различных видов;
- принцип адаптивности к техническому обновлению производственных мощностей, а также появлению новых промышленных и информационных технологий;
- принцип прозрачности для руководства компании всех процессов и работ, осуществляемых в ней;
- принцип недопустимости возникновения противоречий между руководителями подразделений и компании в целом [1, 2].

Указанные принципы в полной мере соответствуют известному закону необходимого разнообразия, а именно «управляющая система не должна иметь разнообразие поведения меньше, чем управляемая». Как указано в [1], смысл данного закона для руководителей связан, как правило, с тем, чтобы не допускать увеличения разнообразия поведения управляемой системы и иметь достаточное количество рычагов воздействия на нее в различных производственных ситуациях. При этом владельцам и руководителям промышленных предприятий и организаций следует всегда помнить, что нельзя допускать бюрократического разрастания аппарата собственных компаний, которые, по крылатому выражению Паркинсона, «стремятся расширить свой штат до бесконечности».

1. Обобщенный анализ управленческих подходов, средств, технологий и механизмов улучшения работы организационных систем

Рассмотрев перечисленные во введении управленческие подходы и школы управления, а также наиболее значимые принципы совершенствования управленческих механизмов, авторы констатировали, что все они выделяли в качестве главной, как правило, одну из сторон совершенствования управленческой деятельности, а именно:

- сокращение времени выполнения разнообразных ручных операций (школа научного управления);
- анализ административных компонентов управления на предприятии (классическая школа управления);
- необходимость создания более сплоченного коллектива в организации за счет улучшения отношений в коллективе (школа человеческих отношений);
- использование исследований психологических особенностей работников и их лидеров для управления поведением неформальных групп в коллективе (школа поведенческих наук);
- применение количественных методов и моделей исследования операций для анализа динамики организационных систем (школа количественного анализа);
- рассмотрение промышленного предприятия или организации как совокупности различных систем и взаимодействия между ними (системный подход к управлению);
- исследование работы организационных систем как совокупности происходящих в ней разнообразных процессов (процессный подход к управлению);
- формирование управленческих воздействий на основе складывающихся на предприятии или в организации ситуаций (ситуационный подход к управлению).

Важно понимать, что стремление авторов и создателей различных школ и подходов к управлению, возможно даже искренне верящих в их «магическую» силу, тем не менее преследовало и иную цель – привлечь владельцев и руководителей промышленных предприятий, корпораций и иных организационных систем к приобретению у них комплекса рекомендаций по внедрению нового подхода к управлению как панацеи к резкому повышению эффективности деятельности.

Разумеется, что такое взятое за правило выделение лишь одной идеи, которая становилась главной, единственной и легко узнаваемой характерной чертой всех без исключения школ или подходов к управлению, во многом способствовало тому, что все они сразу после своего появления быстро привлекали внимание клиентов в лице руководителей фирм, компаний и иных организационных структур. Более того, это стало своеобразной модой, формирующей своего рода визитную карточку каждого нового подхода к управлению или специфического средства, метода или механизма, предлагаемого для резкого улучшения менеджмента в организационных системах. Многочисленные примеры с такого рода разработками очень просто найти в специальной литературе, а их обобщающий анализ – например, в монографиях с участием авторов данной статьи [1–3].

В результате развитие западного менеджмента шло далеко не самым рациональным или последовательным образом, а путем, который был выгоден лишь компаниям – разработчикам вновь создаваемых подходов, методов или средств повышения эффективности управления. Этот путь, не слишком способствующий повышению эффективности работы промышленных предприятий и корпораций, явно проигрывал в своей эффективности далеко не слишком замысловатому подходу советского управления предприятиями, базирующемуся в основном на механизмах охраны труда, социалистического соревнования и т. п. [4]. Эта мысль легко подтверждается огромным преимуществом темпов роста отечественной промышленности в начале и середине XX века по сравнению с тем, как это было в США и других странах Запада.

Однако наблюдаемое в Советском Союзе снижение темпов роста промышленности и экономики, начавшееся уже в 60–70-х годах прошлого века, когда в эти же годы в западных странах происходил мощный технологический подъем, сыграло с руководителями СССР злую шутку. Партийные лидеры тех лет начали без глубокого анализа недостатков и серьезного обоснования внедрять зарубежные подходы и методы управления предприятиями и организациями, что наряду с другими просчетами также способствовало снижению темпов роста экономики страны. Таким образом, к началу 90-х годов уже давно устаревшие на Западе управленческие подходы и монетаристские идеи в экономике стали безоговорочным приоритетом. Российские ученые в

своих трудах тех лет также публиковали разработки, в сущности, пересказывающие зарубежных авторов иногда более пятидесятилетней давности [4]. В этой связи отечественные разработки конца прошлого – начала нового века в области промышленного менеджмента отнюдь не стали полезными для российских промышленных предприятий и организаций, как, впрочем, и их более ранние зарубежные аналоги. К последним следует отнести и такие разработки западного менеджмента, как работы о рациональной бюрократии, способах выживания организаций в условиях постоянно флуктуирующей внешней среды, организации деятельности стейкхолдеров, обоснование внедрения массового производства, обеспечение промышленной гармонии, рациональной организации труда и др. [2]. К западным разработкам по повышению эффективности деятельности организаций относятся также возможности использования различных теорий лидерства, стиля руководства, исследования личных качеств руководителя и т. п.

В научно-технической литературе последних лет особое внимание уделяется вопросам дальнейшего развития информационных систем, их цифровизации, цифровой трансформации, а также разработке и использованию цифровых двойников [5–12]. Именно это направление является в последние годы доминирующим среди прочих разработок по совершенствованию управления организационными системами.

2. Основные механизмы, используемые в процессе формирования и принятия управленческих решений в организационных системах

Рассматривая разнообразные теоретические исследования как зарубежного, так и отечественного менеджмента, можно с достаточной степенью уверенности утверждать, что их применение в практике управления современными организационными структурами в России в виде тех рекомендаций, которые давались этими исследователями, вряд ли целесообразно.

Владельцам и руководителям компаний, корпоративных структур и иных организационных систем в своем алгоритме подготовки и принятия решений по управлению ими целесообразно сформировать следующие блоки или этапы:

– на основе анализа структуры компании, ее производственного, технологического и кадрового потенциалов спродуцировать собственный комплексный взгляд на развитие организации и системы управления ею;

– рассмотреть возможности повышения конкурентоспособности выпускаемой компанией продукции (услуг) за счет снижения издержек производства, обеспечения требуемого уровня характеристик (качества) продукции, гибкого регулирования номенклатуры и объемов выпуска изделий (услуг), индивидуализации подхода к работе с заказчиками и др.;

– принять к сведению, что использование различных зарубежных, а также прозападных отечественных рекомендаций по повышению эффективности работы организации в большинстве случаев не является сколь-либо полезным в современных условиях их деятельности в России.

При этом крайне важно постоянно обеспечивать рост производительности труда, который может лишь в ограниченном объеме происходить лишь за счет улучшения менеджмента предприятий и организаций.

Кроме того, руководителям организаций и предприятий самых разнообразных направлений деятельности следует учитывать, что применение в условиях современной российской действительности почти всех рекомендаций западного менеджмента по повышению эффективности работы компаний зачастую не дает сколь-либо существенного эффекта. Многие российские промышленные предприятия также подошли к пределу роста производительности труда за счет технического оснащения производств, поэтому они не в состоянии обеспечивать требования властных структур по дальнейшему увеличению этого показателя порядка 5 % в год посредством совершенствования промышленных технологий в рамках существующего технологического цикла. В подобных случаях увеличение производительности труда может происходить только путем перехода на более высокие технологические циклы.

Руководителям российских организаций и предприятий следует также отказаться от имеющих место на практике ошибочных мнений или заблуждений о том, что может привести их компании к успеху. Например, о том, что:

– можно в структуре компании иметь неэффективные подразделения, которые могут продолжать работать за счет прибыли приносимой эффективными подразделениями;

– группы единомышленников руководителя компании весьма эффективны, хотя командное руководство нарушает принцип единоначалия, или воздействия, даваемые одними членами команды, могут войти в противоречия с воздействиями, даваемыми другими членами команды;

– руководитель организации, делегировав свои полномочия подчиненным, может высвободить время для аналитической или какой-то иной работы, однако в этом случае глава компании выпускает из своих рук рычаги управления многими ключевыми направлениями работы компании. В результате руководитель перестает осуществлять непосредственное руководство организацией, а его заместители, которым он делегировал полномочия, начинают работать «на себя», возможно даже противореча целям компании в целом;

– все, что позволяет увеличить выпуск готовой продукции, является целесообразным для предприятия или организации, однако в случае падения цен на международных рынках перепроизводство конструкций, товаров и изделий становится для предприятия бессмысленным или даже вредным, так как предприятие затрачивает средства на сырье, электроэнергию, оплату рабочей силы и т. д., но не получает никакой прибыли от продаж, а несет лишь дополнительные затраты, в том числе на складирование продукции;

– логистические цепочки обязательно улучшают управление компаниями, однако они могут привести и к отрицательным результатам для предприятий, так как чрезмерное увлечение логистикой существенно увеличивает время принятия управленческих решений, а это для предприятия совершенно недопустимо;

– для предприятий выгодно заниматься «оптимизацией» налогов, однако попытки «ухода» от налогов, как правило, создают для компаний лишь разнообразные проблемы, решить которые впоследствии намного сложнее;

– главы компаний могут вполне доверять информации, представляемой руководителями подразделений о своей работе, однако последние часто утаивают информацию, пытаясь представить результаты работы возглавляемого ими подразделения как хорошие или даже отличные, хотя на самом деле они могут быть совершенно иными. Это делает абсолютно необходимыми проверки руководством компании представляемых им от подразделений данных о состоянии дел;

– руководители и работники подразделений компании заинтересованы в ее развитии, однако линейные руководители и работники подразделений компании отнюдь не хотят каких-либо изменений в состоянии дел, так как им выгодна стагнация в работе, когда занижены планы и нормы, ибо в этом случае выполнить их намного проще.

Как уже указывалось авторами данной статьи ранее [1], «появление таких заблуждений в значительной степени обусловлено и тем, что практически все дисциплины, так или иначе затрагивающие вопросы управления промышленными предприятиями и организациями, в нашей стране преподаются студентам высших учебных заведений, слушателям самых разнообразных курсов повышения квалификации и т. п. с установкой на то, что разработки теоретиков западного менеджмента, в сущности, и являются единственной панацеей, которая только и может позволить российским производственным компаниям добиться успеха в международной промышленной конкуренции и торговле, хотя условия, в которых вынуждены сегодня функционировать отечественные промышленные предприятия и корпорации, весьма существенно отличаются от тех, в которых находятся их зарубежные конкуренты».

Исследования, оценивающие результаты деятельности российских компаний, показали, что эффективность их работы в некоторых случаях крайне низкая или вообще неудовлетворительная. Это связано не только с техническим оснащением производств, но и с недостаточным использованием актуальных информационных технологий и средств цифровизации.

Поэтому, говоря о средствах, технологиях и механизмах повышения эффективности функционирования организационных систем, можно констатировать, что полного, исчерпывающего алгоритма, во всех случаях обеспечивающего значительный рост производительности труда, не существует. Для каждого предприятия или организации он во многом индивидуален.

В то же время важно принимать во внимание следующие соображения, обеспечивающие повышение эффективности деятельности компании. Они в общем виде могут быть сформулированы следующим образом.

1. Миссия, цели и задачи предприятий и организаций должны в полной мере определять стратегию поведения последних, но с учетом ситуационных внешних и внутренних факторов.

2. Структура и система управления компаниями должны наилучшим образом способствовать их успешной организационно-производственной деятельности. В структуре компании не должно появляться излишних управленческих звеньев, а также возникать различного рода дублирующих функций. Системы управления предприятиями и организациями должны обладать целостностью и способностью к техническому обновлению.

3. Большое значение для повышения эффективной работы предприятий и организаций имеют личный опыт и интуиция их руководителей, которые наряду с предпринимательской активностью и деловыми способностями лиц, принимающих решения, позволяют использовать имеющиеся преимущества и позитивные особенности компаний по сравнению с их конкурентами.

4. Владельцы и руководители компаний должны уделять особое внимание управлению человеческими ресурсами. Такое управление должно базироваться на продуманной, объединяющей все процедуры управления человеческими ресурсами концепции, специально разработанной для конкретного предприятия, организации или иной организационной системы.

5. Руководитель компании должен иметь возможность доступа к любым процедурам и документам, формируемым на всех этапах работы. Это позволяет ему осуществлять всеобъемлющий контроль за финансовыми потоками, использованием ресурсов различного вида, документационным сопровождением, а также за базами данных, складскими запасами, системой продаж и взаимодействиями со стейкхолдерами.

6. Автоматизированные системы управления предприятиями и организациями должны полностью соответствовать сложившейся системе подготовки и принятия управленческих решений, а также контроля их исполнения. При этом объемы контролируемых показателей управления должны быть обозримыми для лиц, принимающих решения, а также позволять отслеживать динамику выпуска готовой продукции, продаж и всех иных процессов.

7. В условиях финансово-экономической нестабильности в мире и различного рода санкций западных стран по отношению к отечественным промышленным предприятиям и организациям необходимо уделять особое внимание мероприятиям по экономии электроэнергии, сырья и материалов, затрат на заработную плату работников и др., что может быть достигнуто за счет минимизации совокупных потерь предприятия.

Ряд последних научных работ отечественных авторов [13–22], направленных на улучшение деятельности предприятий, показывает, что достичь этой цели можно за счет целого ряда мер по совершенствованию кадрового потенциала работников, а также некоторых способов по повышению производительности труда и т. п.

В частности, в [22] предлагаются методы стратегического режима распределения кадрового потенциала как одного из главных факторов управления персоналом.

В [18] предлагается модифицировать концепт и статус эффективности труда в сформулированном автором понимании мобилизационной экономики.

В [16, 19] указано, что для эффективного управления человеческими ресурсами необходимы соответствующие разработки и внедрения индивидуализированных подходов к мотивации и стимулированию сотрудников, а также выбор наилучших практик кадрового обеспечения в соответствующих отраслях.

В [15] представлены объемные рассуждения по вопросам необходимости изучения руководителями организационных систем классификации работников по алгоритмам принятия управленческих решений в зависимости от типов их сознания (иерархического или сетевого), что должно способствовать лучшему пониманию руководителями компании решений, формируемых на всех управленческих уровнях.

Отдельные рекомендации по повышению качества управления человеческими ресурсами изложены авторами данной статьи в [1, 2].

На сегодняшний день стало абсолютно ясно, что для обеспечения эффективного управления организациями и предприятиями у их руководителей должна быть сформирована целая «палитра» современных управленческих средств и механизмов, включая все упомянутые ранее приемы и методы менеджмента, способы повышения производительности труда за счет улучшения технического оснащения производств и использования актуальных промышленных технологий, а также совершенствования информационной поддержки лиц, принимающих решения, на основе актуальных информационных технологий, математических моделей, цифровых двойников,

средств цифровизации и цифровой трансформации в системах управления организационными структурами в целом.

Основным документом, определяющим развитие информационного общества в России, является Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017 г. № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы».

Разнообразные вопросы развития информационных систем предприятий и организаций можно найти, например, в монографии [5], создание и использование математических моделей – в [2, 3, 23], разработки и применения цифровых двойников – в [3, 10, 11].

Отметим, что в нормативно-законодательной базе России до сих пор нет однозначного определения понятий цифровизации, цифровой трансформации и т. п.

В сущности цифровизация представляет собой своего рода процесс, нацеленный на повышение эффективности отдельных функций и операций некой организационной системы путем создания целостного комплекса информационных технологий и систем.

Таким образом, цифровизация обозначает конкретную характеристику процессов в рамках отдельной организационной системы, а цифровая трансформация – относится уже к характеристике функционирования самой организационной системы. В результате цифровая трансформация характеризует переход от одного этапа цифровизации к следующему – более продвинутому.

Руководителям компаний следует понимать, что установка компьютеров на рабочих местах, пусть даже с выходом в глобальные сети, ровно как и формирование информационной системы организации в целом не дают возможности назвать подобную компанию цифровизированной.

Таким образом, процесс цифровизации в организационных системах связан:

- во-первых, с переосмыслением роли информации в системе подготовки принятия решений;
- во-вторых, с переводом информации из аналогового вида в цифровой, базирующимся на соответствующем техническом оснащении, средствами цифровизации;
- в-третьих, с использованием технических устройств в процессе подготовки принятия и реализации управленческих решений;
- в-четвертых, с цифровым совершенствованием бизнес-моделей отдельных процессов и компании в целом;

Цифровая трансформация организационных систем позволяет объединить все процессы цифровизации, происходящие в ней, в целостную, стратегически ориентированную систему управления, построенную на современной цифровой подоснове.

Таким образом, цифровая трансформация информационно-вычислительной системы предприятия или организации является по своей сути результирующим этапом информатизации в организационных системах.

Многие руководители предприятий и организаций, как, впрочем, и некоторые специалисты в области информатизации, ошибочно полагают, что использование математических моделей равносильно применению цифровых двойников. Однако далеко не каждая математическая модель может претендовать на то, что она представляет собой цифровой двойник какого-либо процесса или даже процедуры, реализуемой в организационной системе. Особенно подобное заблуждение выглядит весьма нелепо, когда некоторые разработчики программного обеспечения систем управления утверждают, что они разработали цифровой двойник предприятия или организации. Но примеров разработки цифровых двойников предприятий в современной практике пока не имеется, так как отдельные модели, описывающие лишь какую-либо малую часть управления компаниями, ни в коем случае не могут претендовать на то, что это цифровой двойник организации.

На сегодняшний день цифровые двойники разрабатываются и используются лишь для описания изделий или конструкций, а также, например, для испытаний автомобилей или других транспортных средств, при столкновениях или иных авариях.

Таким образом, приведенные в статье выкладки и соображения могут существенно помочь руководителям организационных систем в вопросах подготовки и принятия разнообразных управленческих решений.

Заключение

На основе представленного в статье обобщенного анализа управленческих подходов, средств, технологий и механизмов улучшения работы организационных систем сформулированы

основные положения по совершенствованию их деятельности, причем как менеджерского, так и технического характера. Особое значение при этом придается внедрению актуальных промышленных и информационных технологий.

Показано что повышение производительности труда для промышленных предприятий и организаций в рамках существующего технологического уклада для очень многих промышленных предприятий уже практически исчерпано и возможно лишь в случае перехода к более высокому технологическому укладу. Поэтому улучшение работы компании может достигаться в основном посредством использования средств цифровизации и цифровой трансформации организационных систем.

В заключение еще раз следует подчеркнуть, что современная управленческая «палитра» эффективного руководителя должна содержать комплекс разнообразных подходов, приемов, методов и механизмов управления всеми процессами и направлениями деятельности различных предприятий и организаций, включая применение автоматизированных систем управления, средств цифровизации и цифровой трансформации, а также внедрение в практику совершенствования работы организационных систем цифровых двойников.

Список литературы

1. Коренная К.А., Логиновский О.В., Максимов А.А. Управление промышленными предприятиями в условиях глобальной нестабильности: моногр.; под ред. А.Л. Шестакова. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2013. 402 с.
2. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: моногр. / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др.; под ред. О.В. Логиновского, А.А. Максимова. М.: Инфра-М, 2018. 410 с.
3. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др.; под ред. О.В. Логиновского. М.: Инфра-М, 2020. 450 с.
4. Логиновский О.В., Максимов А.А. Управление промышленными предприятиями: науч. изд. М.: Машиностроение, 2006. Т. 1. 574 с.
5. Коренная К.А., Логиновский О.В. Максимов А.А. Интегрированные информационные системы промышленных предприятий: моногр.; под ред. А.Л. Шестакова. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2012. 315 с.
6. Механизмы управления: Управление организацией: планирование, организация, стимулирование, контроль / В.Н. Бурков, И.В. Буркова, М.В. Губко и др.; под ред. Д.А. Новикова. М.: Ленанд, 2013. 216 с.
7. Новиков Д.А. Большие данные и большое управление [Электронный ресурс]. URL: https://mipt.ipu.ru/sites/default/files/page_file/BigDataBigControl.pdf (дата обращения: 08.12.2023).
8. Тенденции развития информационного общества в Российской Федерации – 2020: краткий статист. сб. / Федеральная служба гос. статистики; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: НИУ ВШЭ, 2020. 220 с. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oOpt4XM9/infoob_reg2020.pdf (дата обращения: 08.12.2023).
9. Цифровая экономика: 2023: краткий статист. сб. / Г.И. Абдрахманова, С.А. Васильковский, К.О. Вишневский и др.; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: НИУ ВШЭ, 2023. URL: <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/802513326.pdf>.
10. Шуравин А., Московченко А. Что нам может дать цифровой двойник // Control Engineering Россия. 2020. № 3 (87). С. 14–24.
11. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства / Н.В. Курганова, М.А. Филин, Д.С. Черняев и др. // International Journal of Open Information Technologies. 2019. Т. 7, № 5. С. 105–135.
12. Gobble M.-A.M. Digital strategy and digital transformation // Research-Technology Management. 2018. Vol. 61, no. 5. P. 66–71. DOI: 10.1080/08956308.2018.1495969
13. Волгин В.А., Сайбель А.Г. Управление подготовкой кадров высшей квалификации на предприятиях оборонно-промышленного комплекса // Управленческое консультирование. 2022. № 5. С. 72–82. DOI: 10.22394/1726-1139-2022-5-72-82

14. Гостева О.В. Цифровые методы оптимизации системы управления персоналом в угольной промышленности // IX Международная научно-практическая конференция «Вызовы современности и стратегии развития общества в условиях новой реальности». М., 2022. С. 224–226.
15. Делягин М.Г. Конец эпохи: Осторожно, двери открываются! Т. 1. Общая теория глобализации. М.: Наше завтра, 2022. 672 с.
16. Дмитриева С.В. Управление персоналом в промышленном комплексе: современные подходы и стратегии развития человеческого капитала // Человек. Общество. Инклюзия. 2023. Т. 14, № 2. С. 39–46.
17. Дегтярев А.Н. Ключевые тенденции изменения уровня производительности труда в промышленности Республики Башкортостан // Уфимский гуманитарный научный форум. 2022. № 4. С. 12–26. DOI: 10.47309/2713-2358_2022_4_12_26
18. Ермаков Г.П., Ганиева Й.Н., Петряков С.Н. Эффективность труда в мобилизационной экономике // Экономика труда. 2023. Т. 10, № 5. С. 635–652. DOI: 10.18334/et.10.5.117711
19. Ермолов И.Л. О направлениях работы по совершенствованию подготовки инженерных кадров в России // Инновации. 2022. № 2 (280). С. 8–12. DOI: 10.26310/2071-3010.2022.280.2.002
20. Кузнецов С.В., Горин Е.А., Имзалиева М.Р. Национальный технологический суверенитет и три уровня кадрового обеспечения промышленности // Экономика и управление. 2023. Т. 29, № 8. С. 938–955. DOI: 10.35854/1998-1627-2023-8-938-95
21. Смирнова О.П., Чеснюкова Л.К. Особенности развития промышленного комплекса России: промышленная политика и структурно-технологические изменения // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2022. Т. 18, № 12. С. 2230–2248. DOI: 10.24891/ni.18.12.2230
22. Сопилко Н.Ю., Усуби Д.Б. Особенности воспроизводства кадров на современном этапе развития системы управления персоналом на промышленных предприятиях // Наука и искусство управления / Вестник Института экономики, управления и права Российского государственного гуманитарного университета. 2022. № 3. С. 38–52. DOI: 10.28995/2782-2222-2022-3-38-52
23. Ширяев В.И. Финансовые рынки: Нейронные сети, хаос и нелинейная динамика. М.: Ленанд, 2022. 232 с.

References

1. Korennaya K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Upravlenie promyshlennym predpriyatiem v usloviyakh global'noy nestabil'nosti: monografiya* [Management of an industrial enterprise in conditions of global instability. Monograph]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2013. 402 p. (In Russ.)
2. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N. et al. *Management of industrial enterprises: strategies, mechanisms, systems. Monograph*. Moscow: Infra-M; 2018. 410 p. (In Russ.)
3. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *The effective management of organizational and production structures. Monograph*. Moscow: Infra-M; 2020. 450 p. (In Russ.)
4. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami: nauchnoe izdanie* [Management of industrial enterprises]. Moscow: Mashinostroenie; 2006. Vol. 1. 574 p. (In Russ.)
5. Korennaya K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Integrirovannyye informatsionnyye sistemy promyshlennykh predpriyatiy: monografiya* [Integrated information systems of industrial enterprises]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2012. 315 p. (In Russ.)
6. Burkov V.N., Burkova I.V., Gubko M.V. et al. *Mekhanizmy upravleniya: Upravlenie organizatsiy: planirovanie, organizatsiya, stimulirovanie, kontrol'* [Management mechanisms: Organization management: planning, organization, stimulation, control]. Moscow: Lenand; 2013. 216 p. (In Russ.)
7. Novikov D.A. *Bol'shie dannye i bol'shoe upravlenie* [Big data and big management]. (In Russ.) Available at: https://mipt.ipu.ru/sites/default/files/page_file/BigDataBigControl.pdf (accessed 08.12.2023).
8. *Tendentsii razvitiya informatsionnogo obshchestva v Rossiyskoy Federatsii – 2020: kratkiy statisticheskiy sbornik* [Trends in the development of the information society in the Russian Federation – 2020: a brief statistical compendium]. Moscow: National Research University “Higher School of Economics”; 2020. 220 p. (In Russ.) Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oOpt4XM9/info-ob_reg2020.pdf (accessed 08.12.2023).
9. *Tsifrovaya ekonomika: 2023: kratkiy statisticheskiy sbornik* [Digital economy: 2023: a brief statistical collection]. Moscow: National Research University “Higher School of Economics”; 2023. (In Russ.) Available at: <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/802513326.pdf>.

10. Shuravin A., Moskovchenko A. [What a digital twin can give us]. *Control Engineering Russia*. 2020;3(87):14–24. (In Russ.)
11. Kurganova N., Filin M., Cherniaev D., Shaklein A., Namiot D. Digital twins' introduction as one of the major directions of industrial digitalization. *International Journal of Open Information Technologies*. 2019;7(5):105–135. (In Russ.)
12. Gobble M.-A.M. Digital strategy and digital transformation. *Research-Technology Management*. 2018;61(5):66–71. DOI: 10.1080/08956308.2018.1495969
13. Volgin V.A., Saibel A.G. Management of training of highly qualified personnel at enterprises of the military-industrial complex. *Administrative consulting*. 2022;5:72–82. (In Russ.) DOI: 10.22394/1726-1139-2022-5-72-82
14. Gosteva O.V. [Digital methods for optimizing the personnel management system in the coal industry]. In: *IX International Scientific and Practical Conference "Challenges of our time and strategies for the development of society in the conditions of the new reality"*. Moscow; 2022. P. 224–226. (In Russ.)
15. Delyagin M.G. *Konets epokhi: Ostorozhno, dveri otkryvayutsya! T. 1. Obshchaya teoriya globalizatsii* [End of an era: Watch out, the doors are opening! Vol. 1. General theory of globalization]. Moscow: Nashe zavtra; 2022. 672 p. (In Russ.)
16. Dmitrieva S.V. Personnel management in the industrial complex: modern approaches and strategies for the development of human capital. *Human. Society. Inclusion*. 2023;14(2):39–46. (In Russ.)
17. Degtyarev A.N. Key trends in the level of labor productivity in the industry of the Republic of Bashkortostan. *Ufa Humanitarian Scientific Forum*. 2022;4:12–26. (In Russ.) DOI: 10.47309/2713-2358_2022_4_12_26
18. Ermakov G.P., Ganieva Y.N., Petryakov S.N. Labor efficiency in the mobilization economy. *Russian journal of labor economics*. 2023;10(5):635–652. (In Russ.) DOI: 10.18334/et.10.5.117711
19. Ermolov I.L. Improving engineering education in Russia. *Innovations*. 2022;2(280):8–12. (In Russ.) DOI: 10.26310/2071-3010.2022.280.2.002
20. Kuznetsov S.V., Gorin E.A., Imzalieva M.R. National technological sovereignty and three levels of industrial human resource endowment. *Economics and management = Ekonomika i upravlenie*. 2023;29(8):938–955. (In Russ.) DOI: 10.35854/1998-1627-2023-8-938-95
21. Smirnova O.P., Chesnyukova L.K. Features of the development of the industrial complex of Russia: industrial policy and structural and technological changes. *National interests: priorities and security*. 2022;18(12):2230–2248. (In Russ.) DOI: 10.24891/ni.18.12.2230
22. Sopilko N.Yu., Usubi D.B. Features of personnel reproduction at the present stage of development of the personnel management system in the industrial enterprises. *Science and art of management / Bulletin of the Institute of Economics, Management and Law of the Russian State University for the Humanities*. 2022;3:38–52. (In Russ.) DOI: 10.28995/2782-2222-2022-3-38-52
23. Shiryaev V.I. *Finansovye rynki: Neyronnye seti, khaos i nelineynaya dinamika* [Financial markets: Neural networks, chaos and non-linear dynamics]. Moscow: Lennand; 2022. 232 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Вагнер Александр Рудольфович, канд. физ.-мат. наук, ректор, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; admin@susu.ru.

Голлай Александр Владимирович, д-р техн. наук, доц., директор Высшей школы электроники и компьютерных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; alexander@hollay.ru.

Коренная Кристина Александровна, канд. техн. наук, генеральный директор, АО «Кузнецкие ферросплавы», Новокузнецк, Россия; kkgis221@mail.ru.

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskiiov@susu.ru.

Максимов Александр Александрович, д-р техн. наук, депутат, Государственная Дума Федерального Собрания Российской Федерации VIII созыва, Москва, Россия.

Information about the authors

Alexander R. Wagner, Cand. Sci. (Phys. and Math.), rector, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; admin@susu.ru.

Alexander V. Hollay, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Director of the Higher School of Electronics and Computer Science, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; alexander@hollay.ru.

Kristina A. Korennaya, Cand. Sci. (Eng.), General Director, JSC “Kuznetsk Ferroalloys”, Novokuznetsk, Russia; kkris221@mail.ru.

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiiov@susu.ru.

Alexander A. Maksimov, Dr. Sci. (Eng.), Deputy, State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation of the VIII convocation, Moscow, Russia.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.12.2023

The article was submitted 09.12.2023

МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ФОРМИРОВАНИЮ КОМФОРТНОЙ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

А.В. Мельников¹, MelnikovAV@uriit.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1073-7108>
К.В. Галаган², galagankv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3587-8334>

¹ Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий,
Ханты-Мансийск, Россия

² Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема несоответствия реализуемых мероприятий по формированию комфортной городской среды реальным потребностям и ожиданиям граждан. Анализируются существующие методы оценки таких мероприятий, включая индексный метод оценки качества городской среды, применяемый в рамках национального проекта «Жилье и городская среда», а также различные социологические исследования и опросы. Отмечаются недостатки этих подходов, такие как ограниченность выборки респондентов и тематики опросов. **Цель исследования** – разработка метода оценки мероприятий по формированию комфортной городской среды на основе семантического сравнения мнений граждан из социальных сетей, поисковых запросов и описаний самих мероприятий с использованием алгоритмов обработки естественного языка. **Материалы и методы.** Для реализации поставленной цели используется комплексный подход, состоящий из четырех основных этапов. Этап 1. Предобработка исходных текстовых данных – удаление шумов, приведение слов к начальной форме (лемматизация) с помощью библиотеки `ru morphology2`, определение частей речи (POS-tagging). Этап 2. Извлечение ключевых словосочетаний (N-грамм) при помощи алгоритма TF-IDF с учетом частоты употребления в пределах отдельных сообщений и во всем массиве текстов. Расчет ранга значимости N-грамм. Этап 3. Получение векторного представления (word embeddings) для каждой ключевой N-граммы с использованием предобученной нейросетевой модели SBERT. Этап 4. Вычисление меры семантического сходства векторных представлений N-грамм из разных текстовых массивов (мнений граждан и описаний мероприятий) на основе косинусного расстояния. В качестве исходных данных используются тексты мнений граждан и описания мероприятий, направленных на формирование комфортной городской среды, относящиеся к Ханты-Мансийскому автономному округу. **Результаты.** Проведенный эксперимент показал, что большинство проанализированных мероприятий, направленных на формирование комфортной городской среды, слабо коррелируют с реальными потребностями граждан. **Заключение.** Предложенный метод может использоваться в системах поддержки принятия решений для оценки и выбора наиболее эффективных мероприятий.

Ключевые слова: семантический анализ, TF-IDF, трансформеры, sentence transformer, комфортная городская среда, NLP

Для цитирования: Мельников А.В., Галаган К.В. Метод оценки эффективности мероприятий по формированию комфортной городской среды // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 1. С. 87–95. DOI: 10.14529/ctcr240108

Original article
DOI: 10.14529/ctcr240108

METHOD OF ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF MEASURES TO FORM A COMFORTABLE URBAN ENVIRONMENT

A.V. Melnikov¹, MelnikovAV@uriit.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1073-7108>
K.V. Galagan², galagankv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3587-8334>

¹ Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia

² Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

Abstract. The article deals with the urgent problem of inconsistency of the implemented measures to form a comfortable urban environment with the real needs and expectations of citizens. It analyzes the existing methods of assessing such measures, including the index method of assessing the quality of urban environment, used within the framework of the national project “Housing and Urban Environment”, as well as various sociological studies and surveys. The shortcomings of these approaches, such as the limited sample of respondents and survey topics, are noted. **The aim of the study** is to develop a method for evaluating measures to form a comfortable urban environment based on semantic comparison of citizens' opinions from social networks, search queries and descriptions of the measures themselves using natural language processing algorithms. **Materials and methods.** To realize the set goal, an integrated approach consisting of four main stages is used. Stage 1: Pre-processing of initial text data – noise removal, reduction of words to their initial form (lemmatization) using the pymorphy2 library, identification of parts of speech (POS-tagging). Stage 2: Extraction of key word combinations (N-grams) using the TF-IDF algorithm, taking into account the frequency of usage within individual messages and in the whole text array. Calculation of N-grams significance rank. Stage 3: Obtaining a vector representation (word embeddings) for each key N-gram using the pre-trained SBERT neural network model. Step 4: Computing a measure of semantic similarity of vector representations of N-grams from different text arrays (citizens' opinions and event descriptions) based on cosine distance. The texts of citizens' opinions and descriptions of measures aimed at the formation of a comfortable urban environment related to the Khanty-Mansi Autonomous Okrug are used as input data. **Results.** The experiment has shown that most of the analyzed measures aimed at the formation of a comfortable urban environment are poorly correlated with the real needs of citizens. **Conclusion.** The proposed method can be used in decision support systems to evaluate and select the most effective measures.

Keywords: semantic analysis, TF-IDF, transformers, sentence transformer, comfortable urban environment, NLP

For citation: Melnikov A.V., Galagan K.V. Method of assessing the effectiveness of measures to form a comfortable urban environment. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(1):87–95. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240108

Введение

В настоящее время формирование качественной городской среды невозможно представить без участия граждан, жителей города. Более того, вовлечение граждан в мероприятия по формированию качественной городской среды (МФКГС) является одной из целей национального проекта «Жилье и городская среда» (Нацпроект) [1]. Значимость данной цели для Нацпроекта подчеркивается утверждением Минстроем России методических рекомендаций по вовлечению граждан и иных лиц, их объединений в решении вопросов развития городской среды (Методика) [2]. Для граждан вовлеченность в МФКГС означает возможность преобразовать городское пространство согласно своим предпочтениям и потребностям.

Методика предписывает организацию обратной связи от граждан на всех этапах реализации МФКГС. Для этого предполагается, в частности, организовать электронные площадки для сбора обратной связи и выбора МФКГС для реализации. Исследованию вопроса оценки и эффективности подобных платформ посвящена работа [3]. Как показывает исследование, описанное в работе [4], такой способ взаимодействия с гражданами низкоэффективен.

На получение более широкой и качественной обратной связи направлено проведение различных социологических исследований, выявляющих потребности жителей, связанные с комфортной городской средой (КГС). Например, в работах [5–8] представлены результаты таких исследований. При исследованиях в области КГС такой способ получения обратной связи может иметь ряд ограничений. Прежде всего это ограниченность географии и выборки респондентов. Также в социологических опросах жестко ограничены тематика вопросов и варианты ответов.

Снять эти ограничения позволяет получение обратной связи от неограниченного количества респондентов с неограниченным количеством тематик и вопросов. В работах [9, 10] авторы, используя нейросетевые методы обработки естественного языка (NLP), извлекают полезную информацию из сообщений пользователей социальной сети Twitter, что позволяет говорить о существенном расширении географии, аудитории и тематик. Также в работе [11] для получения обратной связи предлагается анализировать сведения об использовании горожанами определенных мобильных приложений.

Такие методы получения обратной связи более оперативны, чем классические социологические опросы.

В настоящей статье представляется описание метода оценки эффективности реализации МФКГС (МОЭР). Метод позволяет на основании мнений граждан, связанных с комфортной городской средой (МГКГС), в социальных медиа, запросов в поисковой системе «Яндекс», а также описаний МФКГС оценить, насколько предлагаемые для реализации МФКГС отвечают ожиданиям граждан. Метод основан на использовании алгоритмов и нейросетевых моделей NLP.

Также произведена экспериментальная проверка метода с использованием прототипа информационной системы (Система).

1. Описание МОЭР

Предлагаемый метод заключается в использовании семантического анализа текстовых сообщений с помощью алгоритмов и нейросетевых моделей NLP. Существенная особенность МОЭР состоит в синтезе алгоритма TF-IDF [12] для нахождения и извлечения из текста семантически значимых фраз и словосочетаний (N-грамм, где N – число слов во фразе или словосочетании) и применения нейросетевых моделей-трансформеров, основанных на архитектуре BERT [13]. Такой подход позволяет сохранить семантическое ядро сообщений, ранжировать полученные N-граммы, получить и проанализировать семантически значимые векторные представления N-грамм на семантическое сходство.

МОЭР включает в себя следующие этапы:

Этап 0. Предобработка и очистка текстовых сообщений.

Этап 1. Извлечение N-грамм и расчет ранга их значимости \mathbb{R} .

Этап 2. Получение вектора контекстного представления (ВКП) для каждой N-граммы.

Этап 3. Расчет семантического сходства ВКП.

На рис. 1 представлена схема этапов и задач метода МОЭР.

1.1. Этап 0. Предобработка и очистка датасета текстовых сообщений

На данном этапе выполняются следующие задачи:

- формирование набора датасетов путем разделения исходного датасета по тематикам сообщений;
- очистка исходных текстовых сообщений от спецсимволов и латиницы с помощью регулярных выражений;
- преобразование слов в сообщениях к их начальной форме (лемматизация);
- частеречная разметка, определение частей речи (POS-tagging).

Лемматизация и POS-tagging производятся с применением методов Python-библиотеки `ru morphology2` [14]. Приведение текстов сообщений к начальной форме необходимо для унификации работы алгоритма TF-IDF и последующего ранжирования N-грамм. POS-tagging используется для управления частеречным составом N-грамм.

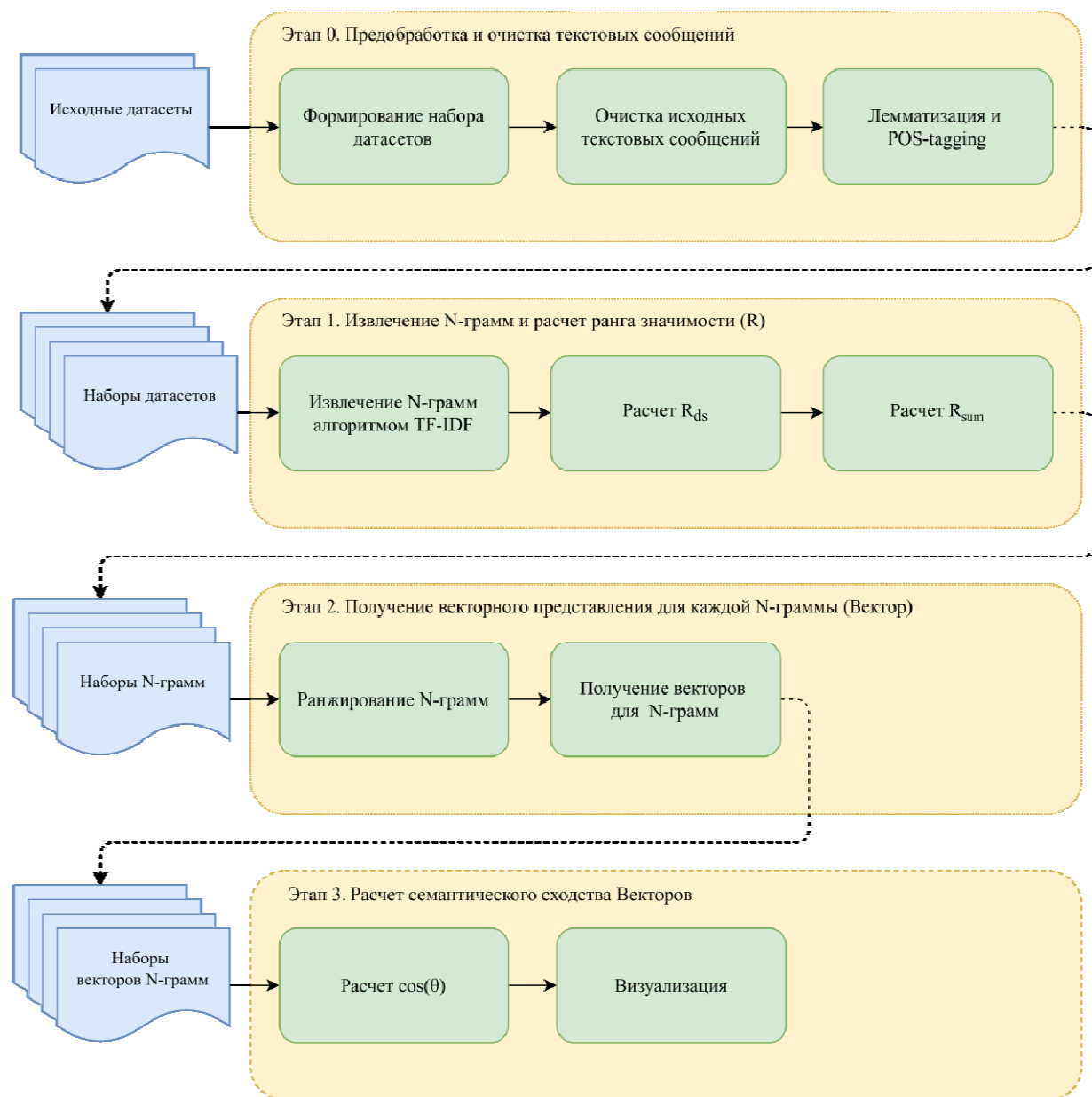


Рис. 1. Схема этапов и задач метода МОЭР
Fig. 1. Scheme of stages and tasks of the method MEI

1.2. Этап 1. Извлечение N-грамм и расчет их ранга значимости

На данном этапе выполняются следующие задачи:

- извлечение N-грамм из датасетов;
- расчет показателя R N-граммы для датасета;
- расчет показателя R N-граммы для набора датасетов.

Для извлечения N-грамм из датасетов используется алгоритм TF-IDF. Расчет значения R N-граммы для датасета (R_{ds}) рассчитывается по формуле

$$R_{ds} = TF_{n-gramm} \times IDF_{n-gramm}, \quad (1)$$

где R_{ds} – ранг N-граммы в датасете; $TF_{n-gramm}$ – частота N-граммы в пределах отдельного сообщения; $IDF_{n-gramm}$ – инверсия частоты, с которой N-грамма встречается во всех сообщениях датасета. Расчет значения R для набора датасетов (R_{sum}) производится по формуле

$$R_{sum} = \sum_{k=1}^m R_{ds_k}, \quad (2)$$

где R_{sum} – суммарный ранг N-граммы в наборе; R_{ds} – ранг N-граммы в датасете.

1.3. Этап 2. Получение ВКП для каждой N-граммы

На данном этапе выполняются следующие задачи:

- ранжирование N-грамм;
- получение ВКП для каждой N-граммы.

Получение ВКП для N-грамм является ключевой особенностью МОЭР. Для получения ВКП N-грамм используется нейросетевая модель, основанная на архитектуре BERT. Это позволяет сформировать векторное пространство, пригодное для различного рода математических преобразований, в частности, расчета меры сходства векторов.

1.4. Этап 3. Расчет семантического сходства ВКП

На данном этапе выполняются следующие задачи:

- расчет косинусного расстояния;
- визуализация.

Для расчета меры сходства ВКП в Методе предлагается использовать метрику косинусного расстояния. Метрика принимает значение от 0, что соответствует максимально далекому расстоянию, до 1, что соответствует максимально близкому расстоянию между векторами. Косинусное расстояние вычисляется по формуле

$$\text{similarity} = \cos \theta = \frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (B_i)^2}}, \tag{3}$$

где A и B – сравниваемые векторы N-грамм; $\cos \theta$ – косинусное расстояние.

2. Данные и эксперимент

Цель эксперимента – определить семантическую близость между мнениями граждан о проблемах городской среды и описаниями мероприятий, направленных на формирование комфортной городской среды. Данные представляют собой две коллекции датасетов с текстами МГКГС, относящихся к территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, и описания МФКГС, проводимые властями муниципальных образований. Для каждого текстового сообщения в датасете устанавливается категория сообщения, наименование муниципального образования, месяц и год публикации сообщения. В табл. 1 представлены краткие характеристики коллекций датасетов.

Таблица 1
Table 1

Краткие характеристики коллекций датасетов
Brief characteristics of dataset collections

Коллекция датасетов	Количество датасетов	Общее количество сообщений в наборе
МГКГС	6224	73 897
МФКГС	108	290

Первичная обработка датасета проводится с помощью регулярных выражений. Удаляются все символы, кроме кириллических и знаков препинания. Также удаляются «стоп-слова»:

- фразы общепринятых обращений;
- фразы приветствий и прощаний;
- названия населенных пунктов, улиц;
- имена собственные.

Из каждого датасета алгоритмом TF-IDF извлекаются N-граммы с параметром N от 2 до 4 и количеством извлеченных N-грамм = 100. Значение R_{ds} и R_{sum} рассчитываются по формулам (1) и (2) соответственно. Значения R_{sum} для ТОП-20 извлеченных N-грамм приведены в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Значения R_{sum} для ТОП-20 извлеченных N-грамм
 R_{sum} values for TOP-20 extracted N-grams

Значение N	Набор датасетов МГКГС		Датасет МФКГС	
	Max R_{sum}	Min R_{sum}	Max R_{sum}	Min R_{sum}
N = 2	59,2314	9,7534	3,8184	1,0173
N = 3	3,7017	1,1024	1,0693	0,5232
N = 4	2,5768	0,8919	0,9183	0,3788

Для дальнейшего анализа из каждого набора датасетов отбираются два набора ТОП-20 N-грамм для $N = 2$. ТОП-20 значений R_{sum} N-грамм при $N = 2$ для каждого набора приведены на рис. 2 и 3.

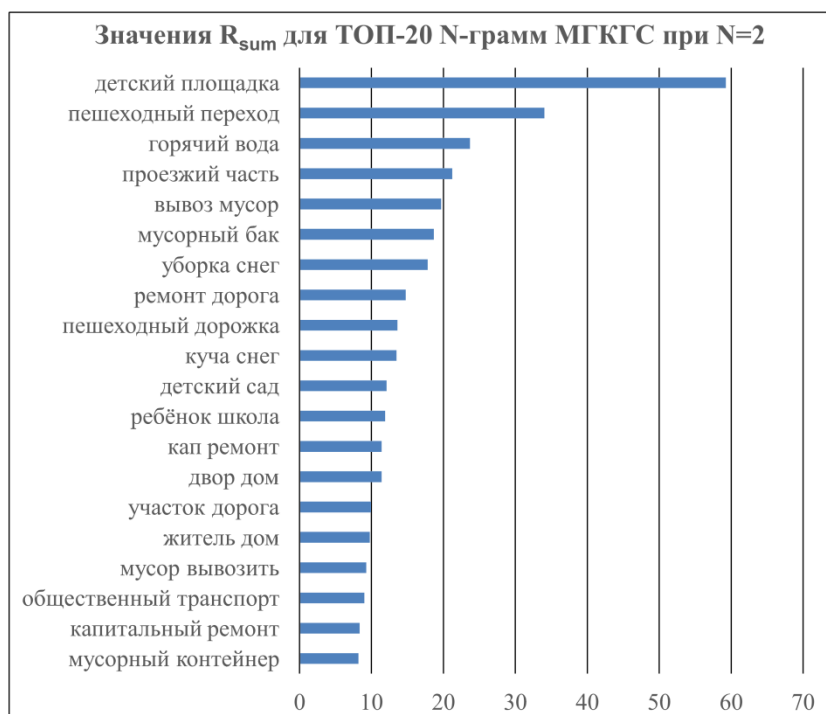


Рис. 2. Значения R_{sum} для ТОП-20 N-грамм датасета МГКГС, при $N = 2$ (N-граммы лемматизированы)
Fig. 2. R_{sum} values for the TOP-20 N-grams of the OCCUE dataset, with $N = 2$ (N-grams are lemmatized)



Рис. 3. Значения R_{sum} для ТОП-20 N-грамм датасета МФКГС, при $N = 2$ (N-граммы лемматизированы)
Fig. 3. R_{sum} values for the TOP-20 N-grams of the MCQUE dataset, with $N = 2$ (N-grams are lemmatized)

Для преобразования N-грамм в ВКП использована предобученная нейросетевая модель sentence-BERT [15]. Никакой тонкой настройки и дообучения для sentence-BERT не проводилось.

Для каждой N-граммы получен одномерный вектор контекстного представления размерностью 512.

Расчет косинусного расстояния проводится между векторами двух наборов ТОП-20 по формуле (3). Визуализация результата расчетов приведена на рис. 4.

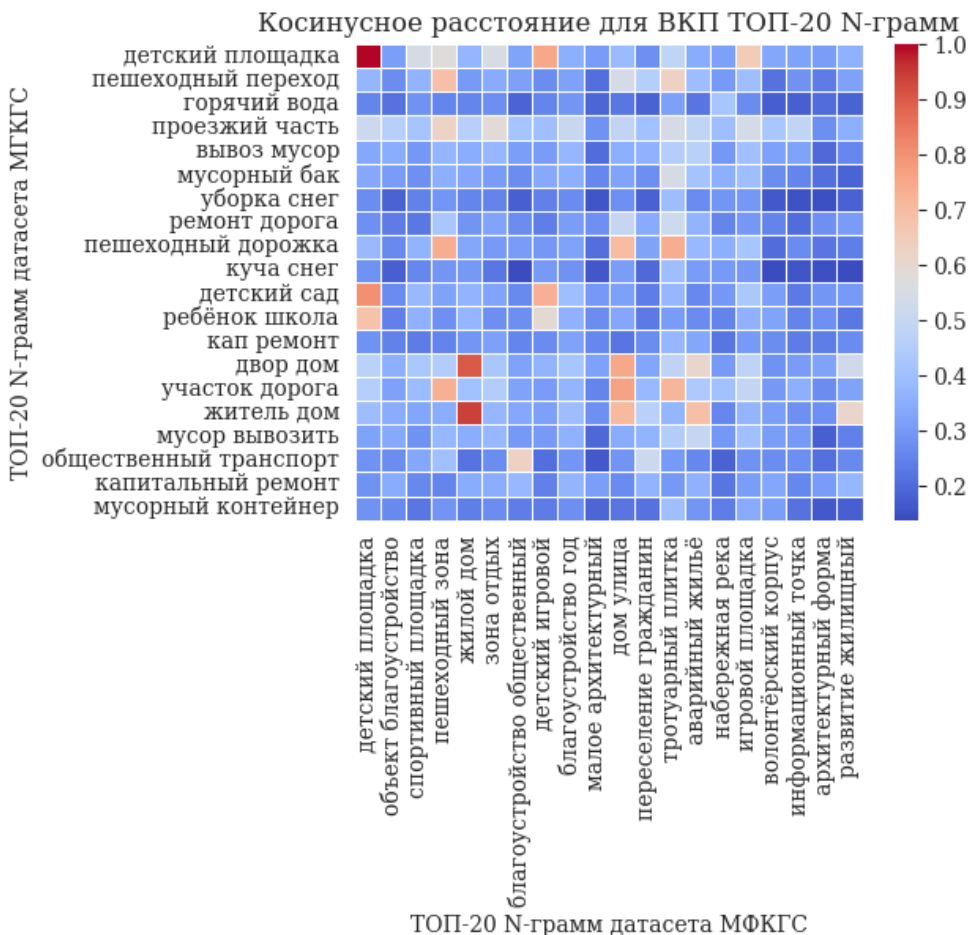


Рис. 4. Результат расчета косинусного расстояния между ТОП-20 N-грамм (N-граммы лемматизированы)
 Fig. 4. The result of calculating the cosine distance between the TOP-20 N-grams (N-grams are lemmatized)

Заключение

Рассмотренный в статье метод оценки мероприятий по формированию комфортной городской среды позволяет эффективно ранжировать и сопоставлять МФКГС с актуальными потребностями граждан.

С помощью МОЭР была проведена оценка эффективности МФКГС, проведенных или планируемых к проведению в 2020–21 гг. на территории Ханты-Мансийского автономного округа Югры.

Результаты проведенного с использованием МОЭР эксперимента указывают на то, что подавляющее количество МФКГС слабо связаны с реальными потребностями граждан в вопросах КГС и, как следствие, будут низкоэффективны.

Приведенный МОЭР может быть применен в системах поддержки принятия решений при проведении оценки значимости МФКГС. Своевременная и качественная реализация МФКГС, направленных на решение реальных потребностей жителей города, положительно скажется на оценке гражданами деятельности местных властей и повысит вовлеченность граждан в вопросы управления городскими пространствами.

Список литературы

1. Паспорт национального проекта «Жилье и городская среда» // Минстрой России: сайт. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/221887/> (дата обращения: 21.09.2021).
2. Об утверждении методических рекомендаций по вовлечению граждан, их объединений и иных лиц в решение вопросов развития городской среды: приказ Минстроя России № 913/пр от 30.12.2020. URL: https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/315/30_12_2020_913_pr_Metodicheskie_rekomendatsii_po_vovlecheniyu.pdf (дата обращения: 31.03.2022).
3. Мухаметов Д.Р. Модели платформ вовлечения граждан для создания в России умных городов нового поколения // Вопросы инновационной экономики. 2020. Т. 10, № 3. С. 1605–1622. DOI: 10.18334/vines.10.3.110683
4. Опыт общественного участия в планировании комфортной городской среды на примере Архангельской области / А.Г. Деменев, Т.Ф. Шубина, П.В. Шубина и др. // Арктика и Север. 2018. № 33. С. 91–117. DOI: 10.17238/issn2221-2698.2018.33.91
5. Аксенова В.В. Комфортная городская среда: общественное мнение москвичей // Социальная политика и социология. 2020. Т. 19, № 4 (137). С. 76–84. DOI: 10.17922/2071-36652020-19-4-76-84
6. Богданова Л.П., Глушкова М.А. Оценка качества городской среды населением города Твери // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. 2021. № 2 (34). С. 14–24. DOI: 10.26456/2226-7719-2021-2-14-24
7. Дунаева Д.О. Дискурсивные практики горожан как коммуникативный механизм формирования образа комфортного города (опыт полевого исследования) // Вестник Томского государственного университета. Философия. Социология. Политология. 2021. № 60. С. 137–150. DOI: 10.17223/1998863X/60/13
8. Руссова О.Н., Смак Т.С., Тарасов И.А. Оценка комфортности городской среды как фактор социального самочувствия городских жителей Архангельской области // Арктика и Север. 2020. № 41. Р. 236–247. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.41.236
9. Detecting citizen problems and their locations using twitter data / G. Abalı, E. Karaarslan, A. Hürriyetoğlu, F. Dalkılıç // 2018 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG). Istanbul, Turkey, 2018. P. 30–33. DOI: 10.1109/SGCF.2018.8408936
10. Estévez-Ortiz F.-J., García-Jiménez A., Glösekötter P. An application of people's sentiment from social media to smart cities // El profesional de la información. 2016. Vol. 25, no. 6. P. 851–858. DOI: 10.3145/epi.2016.nov.02
11. Алексеев С.А. Коммуникативно-информационные технологии в повышении качества городской среды // Управление устойчивым развитием. 2019. № 6 (25). С. 36–40.
12. Spärck Jones K. A statistical interpretation of term specificity and its application in retrieval // Journal of Documentation. 2004. Vol. 60, no. 5. P. 493–502. DOI: 10.1108/00220410410560573
13. Attention Is All You Need / Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar et al. // 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017). Long Beach, CA, USA. 2017. URL: <https://arxiv.org/pdf/1706.03762.pdf> (дата обращения: 30.05.2022).
14. Korobov M. Morphological Analyzer and Generator for Russian and Ukrainian Languages. 2015. URL: <https://arxiv.org/pdf/1503.07283.pdf> (дата обращения: 30.05.2022).
15. Reimers N., Gurevych I. Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1908.10084.pdf> (дата обращения: 30.05.2022).

References

1. *Pasport natsional'nogo proekta "Zhil'e i gorodskaya sreda"* [Passport of the national project "Housing and Urban Environment"]. *Ministry of Construction of Russia: website*. (In Russ.) Available at: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/22188> (accessed 21.09.2021)
2. *Ob utverzhdenii metodicheskikh rekomendatsiy po vovlecheniyu grazhdan, ikh ob"edineniy i inykh lits v reshenie voprosov razvitiya gorodskoy sredy: prikaz Ministroya Rossii № 913/pr ot 30.12.2020* [On approval of guidelines for the involvement of citizens, their associations and other persons in resolving issues of the development of the urban environment: order of the Ministry of Construction of Russia No. 913/pr dated 30.12.2020]. (In Russ.) Available at: https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/315/30_12_2020_913_pr_Metodicheskie_rekomendatsii_po_vovlecheniyu.pdf (accessed 31.03.2022).
3. Mukhametov D.R. Models of citizen engagement platforms for creating new generation smart

cities in Russia. *Russian Journal of Innovation Economics*. 2020;10(3):1605–1622. (in Russ.) DOI: 10.18334/vinec.10.3.110683

4. Demenev A.G., Shubina T.F., Shubina P.V. et al. Public participation in planning a comfortable urban environment on the example of the Arkhangelsk region. *Arctic and North*. 2018;33:91–117. DOI: 10.17238/issn2221-2698.2018.33.91 (In Russ.)

5. Aksenova V.V. Comfortable urban environment: public opinion of Muscovites. *Socialnaya politika i sociologiya = Social policy and sociology*, 2020;19(4(137)):76–84. (In Russ.) DOI: 10.17922/2071-36652020-19-4-76-84

6. Bogdanova L.P., Glushkova M.A. Assessment of quality of the city environment by populations of the city Tver. *Herald of Tver state university. Series: Geography and geocology*. 2021;2(34):14–24. (In Russ.) DOI: 10.26456/2226-7719-2021-2-14-24

7. Dunaeva D.O. Discursive practices of citizens as a communicative mechanism for forming the image of a comfortable city (practical research experience). *Tomsk state university journal of philosophy, sociology and political science*. 2021;60:137–150. (In Russ.) DOI: 10.17223/1998863X/60/13

8. Russova O.N., Smak T.S., Tarasov I.A. Assessment of the comfort of the urban environment as a factor in the social well-being of citizens of the Arkhangelsk oblast. *Arctic and North*. 2020;41:236–247. (In Russ.) DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.41.236

9. Abalı G., Karaarslan E., Hürriyetoğlu A., Dalkılıç F. Detecting citizen problems and their locations using twitter data. In: *2018 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG)*. Istanbul, Turkey; 2018. P. 30–33. DOI: 10.1109/SGCF.2018.8408936

10. Estévez-Ortiz F.-J., García-Jiménez A., Glösekötter P. An application of people's sentiment from social media to smart cities. *El profesional de la información*. 2016;25(6):851–858. DOI: 10.3145/epi.2016.nov.02

11. Alekseev S.A. Communicative information technologies to increase the quality of the city environment. *Managing Sustainable Development*. 2019;6(25):36–40. (In Russ.)

12. Spärck Jones K. A statistical interpretation of term specificity and its application in retrieval. *Journal of Documentation*. 2004;60(5):493–502. DOI: 10.1108/00220410410560573

13. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N. et al. Attention Is All You Need. In: *31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017)*. Long Beach, CA, USA. 2017. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1706.03762.pdf> (accessed 30.05.2022).

14. Korobov M. Morphological Analyzer and Generator for Russian and Ukrainian Languages. 2015. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1503.07283.pdf> (accessed 30.05.2022).

15. Reimers N., Gurevych I. Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks. 2019. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1908.10084.pdf> (accessed 30.05.2022).

Информация об авторах

Мельников Андрей Витальевич, д-р техн. наук, проф., директор, Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия; MelnikovAV@uriit.ru.

Галаган Константин Владимирович, аспирант кафедры цифровых технологий Института цифровой экономики, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия; galagankv@gmail.com.

Information about the authors

Andrey V. Melnikov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia; MelnikovAV@uriit.ru.

Konstantin V. Galagan, Postgraduate Student of the Department of Digital Technologies, Institute of Digital Economy, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia; galagankv@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.09.2023

The article was submitted 11.09.2023

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМОЙ РЫНКА ТРУДА НА ЗАДАННОМ ВРЕМЕННОМ ИНТЕРВАЛЕ

С.А. Федосеев, fsa@gelicon.biz

Д.Л. Горбунов, call-of-monolit@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3186-3680>

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия*

Аннотация. Соотношение спроса и предложения на рынке труда – один из важнейших критериев эффективности функционирования экономической системы на макроуровне. Решение вопросов управления и прогнозирования динамики кадров на рынке труда является важным в силу того, что качество продукции напрямую зависит от уровня квалифицированности рабочей силы. Повышение эффективности кадровой политики работодателей требует разработки новых инструментов управления и прогнозирования динамических процессов рынка труда на макро- и микроуровнях. Рассматривается задача оптимального управления предложенной ранее замкнутой системой рынка труда. Сформулирована в общем виде задача оптимального управления системой, описываемой системой нелинейных дифференциальных уравнений. **Цель исследования:** нахождение кусочно-постоянных значений управления, при которых соотношение «цена – качество» на рынке труда будет максимальным в течение ближайших трёх лет. **Материалы и методы.** Согласно концепции модели, субъекты рынка труда делятся на три категории в зависимости от величины спроса на их труд: субъекты высокой, низкой и средней квалификации. Принята гипотеза, согласно которой вакантные места на рынке труда считаются занятыми субъектами низкой квалификации. В силу доказанной ранее единственности решения задачи оптимального управления замкнутым рынком труда обоснован жадный алгоритм нахождения максимального значения соотношения «цена – качество» на рынке труда. С помощью Wolfram Mathematica по найденному ранее способу сформулированная задача оптимального управления решена на каждом временном полуинтервале. **Результаты.** Получены значения управления, при которых соотношение «цена – качество» на рынке труда посёлка Сылва Пермского края в течение ближайших трёх лет будет максимальным. Результаты обосновывают рекомендацию ввести более строгие требования к соискателям вакантных должностей на градообразующем предприятии посёлка Сылва Пермского края.

Ключевые слова: дифференциальная модель, система нелинейных дифференциальных уравнений, замкнутый рынок труда, оптимальное управление, кусочно-постоянные функции

Для цитирования: Федосеев С.А., Горбунов Д.Л. Алгоритм оптимального управления замкнутой системой рынка труда на заданном временном интервале // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 1. С. 96–105. DOI: 10.14529/ctcr240109

Original article
DOI: 10.14529/ctcr240109

AN ALGORITHM FOR OPTIMAL CONTROL OF A CLOSED LABOR MARKET SYSTEM AT A GIVEN TIME INTERVAL

S.A. Fedoseev, fsa@gelicon.biz

D.L. Gorbunov, call-of-monolit@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3186-3680>

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract. The ratio of supply and demand in the labor market is an important criteria for the effectiveness of the functioning of the economic system at the macro level. Improving the effectiveness of employers' personnel policy requires the development of new control tools and forecasting of dynamic labor market processes at the macro and micro levels. The problem of optimal control of the previously proposed closed labor market system is considered. The problem of optimal control of a system described by a system of

nonlinear differential equations is formulated in general form. **Aim.** Finding piecewise constant control values at which the price-quality ratio in the labor market will be maximum over the next three years. **Materials and methods.** According to the concept of the model, the subjects of the labor market are divided into three categories depending on the amount of demand for their labor: subjects of high, low and medium qualifications. A hypothesis has been adopted according to which vacant places in the labor market are considered to be occupied by low-skilled subjects. Due to the previously proven uniqueness of solving the problem of optimal control of a closed labor market, a greedy algorithm for finding the maximum value of the price-quality ratio in the labor market is justified. Using Wolfram Mathematica, according to the method found earlier, the formulated optimal control problem was solved at each time half-interval. **Results.** Control values have been obtained at which the price-quality ratio in the labor market of the village of Sylva in the Perm Territory will be maximum over the next three years. The results substantiate the recommendation to introduce stricter requirements for applicants for vacant positions at the city-forming enterprise of the village of Sylva in the Perm Territory.

Keywords: differential model, system of nonlinear differential equations, closed labor market, optimal control, piecewise constant functions

For citation: Fedoseev S.A., Gorbunov D.L. An algorithm for optimal control of a closed labor market system at a given time interval. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2024;24(1):96–105. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240109

Введение

Соотношение спроса и предложения на рынке труда – один из важнейших критериев эффективности функционирования экономической системы на макроуровне. Участником процесса создания продуктов как объектов товарооборота государства является трудоустроенное население, которому, в свою очередь, можно противопоставить безработных. Решение вопросов управления и прогнозирования динамики кадров на рынке труда влияет на качество функционирования всей экономики в целом, поэтому они никогда не теряют своей актуальности.

Например, в [1, 2] осуществлён всесторонний обзор проблемы текучести кадров на рынке труда. В работах [3, 4] исследуются математические закономерности текучести кадров на рынке труда – этот вопрос перекликается с настоящим исследованием. Также с настоящим исследованием перекликается теория коллективной текучести кадров, где анализируется соотношение количества ушедших работников с их качеством (квалификацией) [5]. Что касается работ, посвящённых вопросам оптимального управления рынка труда, то в [6] к стохастической дифференциальной модели рынка труда из [7] применён аппарат оптимального управления.

Для предложенной авторами в [8, 9] конечномерной детерминированной математической модели рынка труда в [10] также сформулирована и решена задача оптимального управления. Здесь предлагается задача оптимального управления замкнутым детерминированным рынком труда в пространстве кусочно-постоянных функций на конечном временном интервале [11]. В общем виде задача кусочно-непрерывного управления объектом, описываемым системой нелинейных дифференциальных уравнений, формулируется следующим образом [12].

Пусть состояние управляемого объекта определяется задачей Коши: $\dot{x}(t) = f(x, u, t)$, $t \in (0; T]$, $x(0) = x_0$, где $x = x(t) \in \mathbb{R}^n$, $t \in [0; T]$ – фазовое состояние объекта; управление $u = u(t) \in \mathbb{R}^m$ постоянно на каждом полуинтервале $(t_{j-1}; t_j]$, $j = \overline{1, p}$, полученном разбиением отрезка $[0; T]$ на p полуинтервалов, т. е. [13]: $u(t) = k_j = const$, $k_j \in \mathbb{R}^m$, $t \in (t_{j-1}; t_j]$, $t_0 = 0$, $t_p = T$; функционал качества $I_j = I(u(t), x_j(t))$ на каждом полуинтервале. Задача заключается в нахождении кусочно-постоянных значений управления $u(t)$, при которых функционал качества $J = \sum_{j=1}^p I(u(t), x_j(t)) \rightarrow \max$ при ограничениях типа равенств: $F(u(t), x(t), \dot{x}(t)) = 0$, $x(t_{j-1}) = x_{j-1}^*$, $x(t_j) = x_j^{**}$ и неравенств: $|u(t)| \leq u^*$, $t \in [0; t_p]$.

Для общего случая условие существования экстремали и условие экстремума сформулированы в виде теоремы Понтрягина в [14].

**1. Оптимальное управление замкнутым рынком труда
с кусочно-постоянным коэффициентом селекции**

В [8] представлена следующая модель замкнутого рынка труда:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\alpha}_1(t) = \frac{A - M \sum_{i=1}^n \alpha_i(t)}{N} (\gamma_1(t) + \hat{k}\beta_1(t)), \\ \dots \\ \dot{\alpha}_n(t) = \frac{A - M \sum_{i=1}^n \alpha_i(t)}{N} (\gamma_n(t) + \hat{k}\beta_n(t)); \\ \dot{\beta}_1(t) = \frac{B - M \sum_{i=1}^n \beta_i(t)}{N} (\gamma_1(t) + \hat{k}\beta_1(t)) - \hat{k}\beta_1(t), \\ \dots \\ \dot{\beta}_n(t) = \frac{B - M \sum_{i=1}^n \beta_i(t)}{N} (\gamma_n(t) + \hat{k}\beta_n(t)) - \hat{k}\beta_n(t); \\ \dot{\gamma}_1(t) = \frac{G - M \sum_{i=1}^n \gamma_i(t)}{N} (\gamma_1(t) + \hat{k}\beta_1(t)) - \gamma_1(t), \\ \dots \\ \dot{\gamma}_n(t) = \frac{G - M \sum_{i=1}^n \gamma_i(t)}{N} (\gamma_n(t) + \hat{k}\beta_n(t)) - \gamma_n(t). \end{array} \right. \quad (1)$$

при условии

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i(t) + \sum_{i=1}^n \beta_i(t) + \sum_{i=1}^n \gamma_i(t) \equiv 1; \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_i(t) \in [0; 1]; \\ \beta_i(t) \in [0; 1]; \\ \gamma_i(t) \in [0; 1]; \\ k_i \in (0; 1]. \end{array} \right. \quad (3)$$

Здесь A – общее число специалистов высокой категории на рынке труда; B – общее число специалистов средней категории на рынке труда; G – общее число специалистов низкой категории на рынке труда; M – общее число рабочих мест, занятых на предприятии; N – общее число безработных на рынке труда; q – количество подразделений предприятия; k_i – коэффициент селекции [15, 16]. Далее $\alpha_i(t)$ – доля специалистов высокой категории i -го подразделения среди всех трудоустроенных субъектов рынка труда; $\beta_i(t)$ – доля специалистов средней категории i -го подразделения среди всех трудоустроенных субъектов рынка труда; $\gamma_i(t)$ – доля специалистов низкой категории i -го подразделения среди всех трудоустроенных субъектов рынка труда. Отметим, что $\alpha_i(t)$, $\beta_i(t)$, $\gamma_i(t)$ – неизвестные функции, тогда как A , B , G , M , N , n , k_i – целые.

В [10] решена задача управления для замкнутого рынка труда, где $\hat{k} = \text{const}$ на всём временном отрезке $t \in [0; T]$. Рассмотрим случай, когда $\hat{k} = \hat{k}(t)$ – кусочно-постоянная функция, заданная таблично для p промежутков времени:

$\hat{k}(t)$	\hat{k}_1	\hat{k}_2	...	\hat{k}_p
t	$[0; t_1]$	$(t_1; t_2]$...	$(t_{p-1}; t_p]$

(4)

где $\hat{k}_j \in (0; 1]$, $j = \overline{1, p}$. Тогда система (1) примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\alpha}_{1j}(t) = \frac{A - M \sum_{i=1}^n \alpha_{ij}(t)}{N} (\gamma_{1j}(t) + \hat{k}_j(t) \beta_{1j}(t)), \\ \dots \\ \dot{\alpha}_{nj}(t) = \frac{A - M \sum_{i=1}^n \alpha_{ij}(t)}{N} (\gamma_{nj}(t) + \hat{k}_j(t) \beta_{nj}(t)); \\ \dot{\beta}_{1j}(t) = \frac{B - M \sum_{i=1}^n \beta_{ij}(t)}{N} (\gamma_{1j}(t) + \hat{k}_j(t) \beta_{1j}(t)) - \hat{k}_j(t) \beta_{1j}(t), \\ \dots \\ \dot{\beta}_{nj}(t) = \frac{B - M \sum_{i=1}^n \beta_{ij}(t)}{N} (\gamma_{nj}(t) + \hat{k}_j(t) \beta_{nj}(t)) - \hat{k}_j(t) \beta_{nj}(t); \\ \dot{\gamma}_{1j}(t) = \frac{G - M \sum_{i=1}^n \gamma_{ij}(t)}{N} (\gamma_{1j}(t) + \hat{k}_j(t) \beta_{1j}(t)) - \gamma_{1j}(t), \\ \dots \\ \dot{\gamma}_{nj}(t) = \frac{G - M \sum_{i=1}^n \gamma_{ij}(t)}{N} (\gamma_{nj}(t) + \hat{k}_j(t) \beta_{nj}(t)) - \gamma_{nj}(t). \end{array} \right. \quad (5)$$

при условии

$$\sum_{i=1}^n \alpha_{ij}(t) + \sum_{i=1}^n \beta_{ij}(t) + \sum_{i=1}^n \gamma_{ij}(t) \equiv 1; \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{ij}(t) \in [0; 1]; \\ \beta_{ij}(t) \in [0; 1]; \\ \gamma_{ij}(t) \in [0; 1]; \\ k_j \in (0; 1] \end{array} \right.$$

для каждого из p промежутков времени ($j = \overline{1, p}$).

Пусть $\hat{k}(t)$ описывается функцией (4). Тогда

- управление $u(\cdot) \equiv \hat{k}(t)$, где $\hat{k} \in (0; 1]$;

- функции состояния системы на j -м промежутке времени ($j = \overline{1, p}$):

$$x_j(\cdot) = (\alpha_{1j}(t), \dots, \alpha_{nj}(t), \beta_{1j}(t), \dots, \beta_{nj}(t), \gamma_{1j}(t), \dots, \gamma_{nj}(t));$$

- функционал качества управления системой на j -м промежутке времени ($j = \overline{1, p}$):

$$I(u, x_j) = r_{\alpha j} \sigma_{\alpha j}(\hat{k}, t) + r_{\beta j} \sigma_{\beta j}(\hat{k}, t) + r_{\gamma j} \sigma_{\gamma j}(\hat{k}, t), \text{ где}$$

$$\sigma_{\alpha j} = \sum_{i=1}^n \alpha_{ij}(\hat{k}_j, t), \quad \sigma_{\beta j} = \sum_{i=1}^n \beta_{ij}(\hat{k}_j, t), \quad \sigma_{\gamma j} = \sum_{i=1}^n \gamma_{ij}(\hat{k}_j, t);$$

- $r_{\alpha j}, r_{\beta j}, r_{\gamma j}$ – коэффициенты качества [10].

На каждом из p временных промежутков найти $\hat{k} = \hat{k}_j^*$ такое, что $\sum_{j=1}^p I(u, x_j) \rightarrow \max$ при ог-

раничениях типа равенств (5) и (6) и неравенств (7).

В силу единственности оптимального управления для каждого из p временных промежутков, показанной в [10], задачу максимизации суммы можно решить путём максимизации каждого j -го слагаемого, т. е. уместно использовать жадный алгоритм [17]. Таким образом, задача оптимального управления замкнутым рынком труда с n источниками спроса разбивается на p подзадач, связанных между собой таким образом, что результаты j -й подзадачи являются входными данными для $j+1$ -й подзадачи, поэтому их необходимо решать последовательно для каждой $j = \overline{1, p}$.

Нахождение \hat{k}_1^* на первом временном промежутке для $t \in (0; t_1]$ осуществляется по аналогии с решением задачи управления замкнутым рынком труда, где $\hat{k} = \text{const}$ на всём временном отрезке $t \in [0; T]$, которое приведено в [10]. Значения функций состояния $x_1(\cdot)$ в момент времени t_1 будут выбраны в качестве исходных значений для нахождения \hat{k}_2^* на втором временном промежутке и т. д. Решением задачи оптимального управления рынка труда будет функция (4) с найденными значениями в каждый временной промежуток.

2. Пример оптимального управления рынком труда посёлка Сылва Пермского края в течение трёх лет

По официальным данным [18, 19] рассчитаем текущие значения входных параметров системы (5) для рынка труда посёлка Сылва Пермского края, приняв «гипотезу С» из [15, 16], согласно которой вакантные места считаются занятыми субъектами низкой категории. Отсюда на градообразующем предприятии АО «Пермская птицефабрика» положим $r_{\alpha j} = r_{\alpha} = \text{const}$, $r_{\beta j} = r_{\beta} = \text{const}$, $r_{\gamma j} = r_{\gamma} = 0$ и $r_{\alpha} > r_{\beta} > r_{\gamma}$. Найдём оптимальное управление рынком труда посёлка Сылва Пермского края в 2024–2026 гг., т. е. на трёхлетнем промежутке, при условии, что для АО «Пермская птицефабрика» $\hat{k} = \hat{k}(t)$. Тогда управление $u \equiv \hat{k}(t)$ описывается функцией (4), где $p = 3$.

Решим последовательно задачи оптимального управления для каждого из трёх временных промежутков, начиная с 2024 года. Аналогично [10] с помощью Wolfram Mathematica построим график $I(u, x_1)$ при заданных начальных условиях таких, что значения констант функций состояния системы $x_1(\cdot)$ характеризуют рынок труда посёлка Сылва Пермского края на конец 2023 года [18, 19]. Тогда уравнение $\partial I / \partial \hat{k} = 0$ имеет решение на отрезке $\hat{k} \in (0; 1]$, и $\exists \hat{k}^* \in (0; 1]: \forall \hat{k} \in (0; 1] / \{\hat{k}^*\} I(\hat{k}^*) > I(\hat{k})$ в момент времени $t = t_1$, показанное на рис. 1.

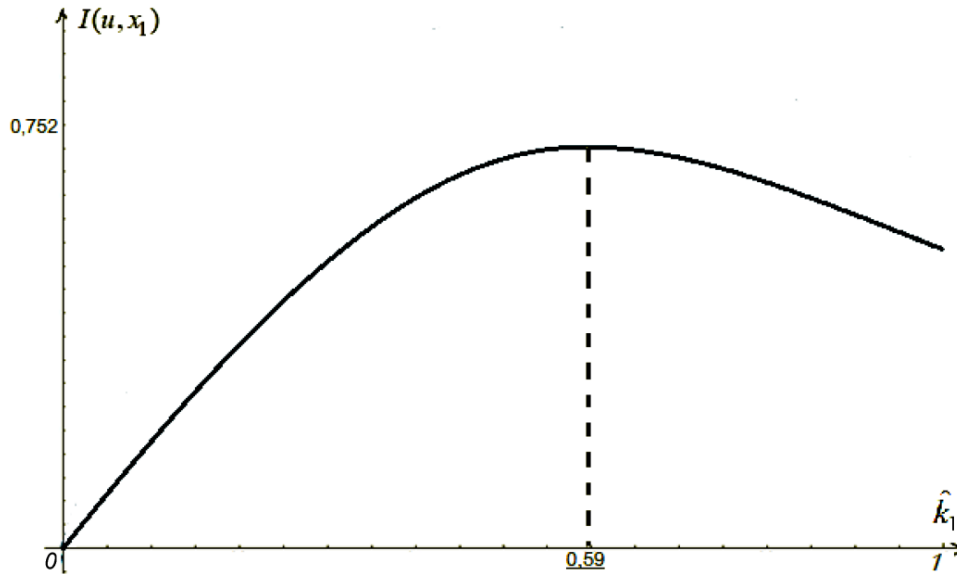


Рис. 1. График функции соотношения «цена – качество» для всех трудоустроенных кадров на рынке труда посёлка Сылва Пермского края на 2024 г.

Fig. 1. Graph of the price-quality ratio function for all employed personnel in the labor market of the village Sylva in the Perm Territory for 2024

Как видно из графика, $\hat{k}_1^* = 0,59$.

Следующим шагом построим график $I(u, x_2)$ при заданных начальных условиях таких, что значения констант функций состояния системы $x_2(\cdot)$ характеризуют рынок труда посёлка Сылва Пермского края на конец 2024 года при $\hat{k}_1^* = 0,59$. Получим график $I(u, x_2)$, показанный на рис. 2.

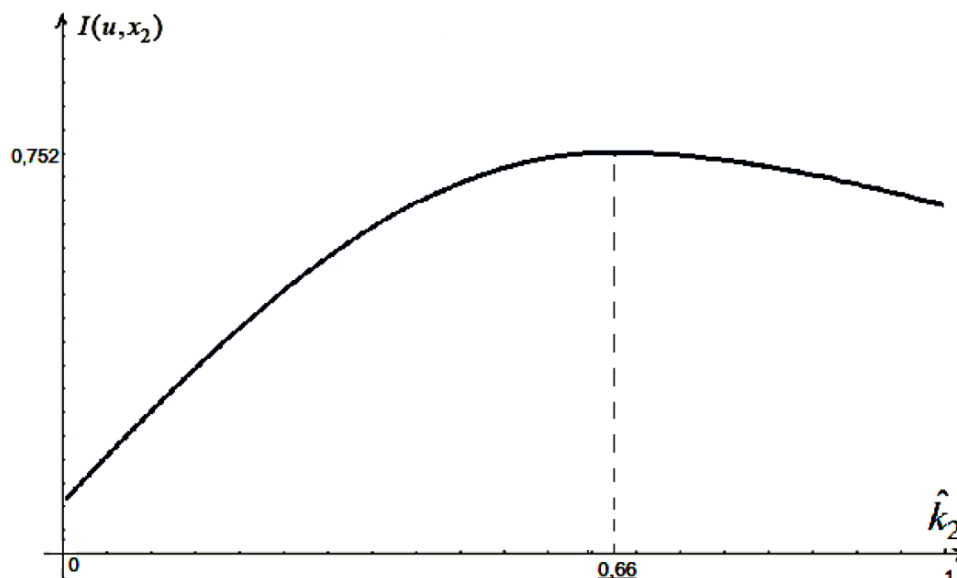


Рис. 2. График функции соотношения «цена – качество» для всех трудоустроенных кадров на рынке труда посёлка Сылва Пермского края на 2025 г.

Fig. 2. Graph of the price-quality ratio function for all employed personnel in the labor market of the village Sylva in the Perm Territory for 2025

Как видно из графика, $\hat{k}_2^* = 0,66$.

Аналогично построим график $I(u, x_3)$ при $\hat{k}_2^* = 0,66$ (рис. 3).

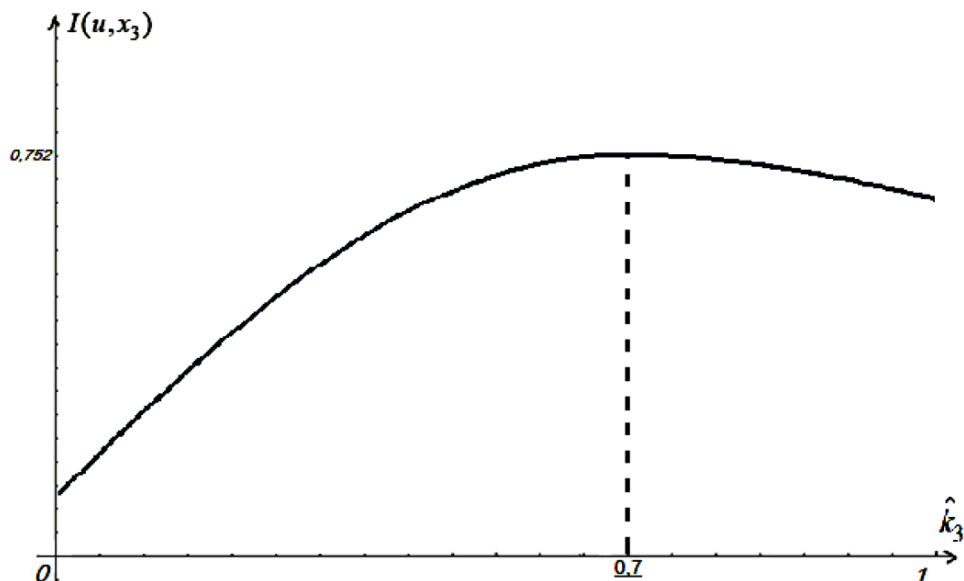


Рис. 3. График функции соотношения «цена – качество» для всех трудоустроенных кадров на рынке труда посёлка Сылва Пермского края на 2026 г.

Fig. 3. Graph of the price-quality ratio function for all employed personnel in the labor market of the village Sylva in the Perm Territory for 2026

Как видно из графика, $\hat{k}_3^* = 0,7$.

Таким образом, функция $\hat{k} = \hat{k}(t)$ для рынка труда посёлка Сылва Пермского края на промежутке 2024–2026 гг. имеет следующий вид (рис. 4):

$\hat{k}(t)$	0,59	0,66	0,7
t	$[0; t_1]$	$(t_1; t_2]$	$(t_2; t_3]$

(8)

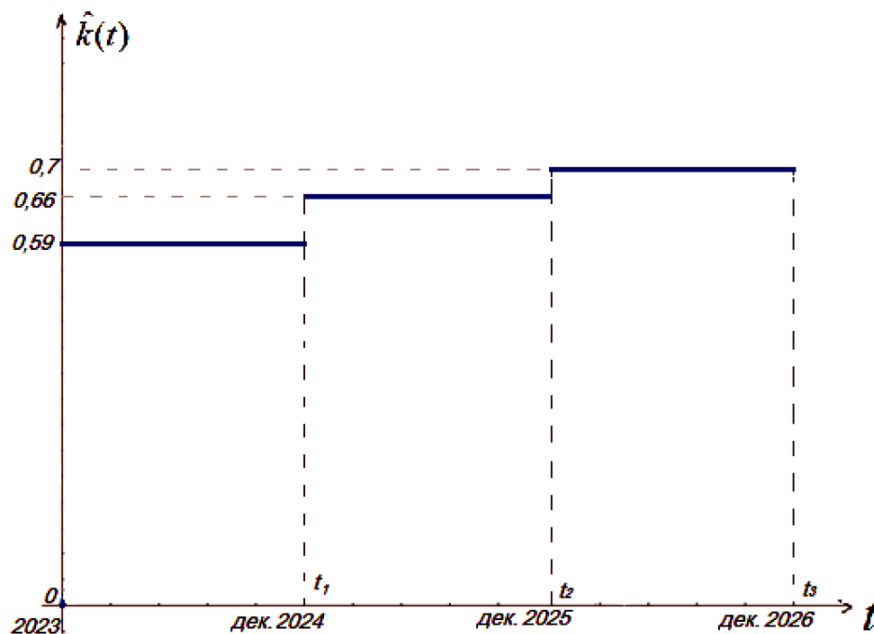


Рис. 4. График функции $\hat{k} = \hat{k}(t)$ для рынка труда посёлка Сылва Пермского края на промежутке 2024–2026 гг.

Fig. 4. Graph of the function $\hat{k} = \hat{k}(t)$ for the labor market of the village Sylva in the Perm Territory for 2024–2026

Очевидно, значение \hat{k}_i^* с каждым годом увеличивается. Такое поведение функции $\hat{k}(t)$ объясняется тем, что при $r_\alpha > r_\beta > r_\gamma$ максимизация функционала соотношения «цена – качество» на рынке труда в общем случае подразумевает увеличение коэффициента селекции [10].

Таким образом, оптимальное управление рынком труда посёлка Сыльва Пермского края подразумевает постепенное повышение значения коэффициента селекции на градообразующем предприятии. Учитывая, что на конец 2023 года значение коэффициента селекции АО «Пермская птицефабрика» согласно принятой выше «гипотезе С» [15, 16] равняется 0,44, в будущем году рекомендуется установить более строгие требования к соискателям вакантных должностей.

Заключение

Для предложенной в [9] модели замкнутого рынка труда коэффициент селекции впервые рассмотрен как кусочно-постоянная функция от времени. Сформулирована и решена задача оптимального управления реально существующим рынком труда посёлка Сыльва Пермского края на ближайшие три года при условии, что коэффициент селекции градообразующего предприятия меняется каждый год, а коэффициенты качества остаются константами.

В дальнейшем коэффициенты качества также возможно рассмотреть как функции от времени, поскольку усреднённая оплата труда по субъектам всех трёх уровней квалификации в разрезе нескольких лет может меняться как минимум с поправкой на инфляцию и индексацию заработной платы.

Список литературы

1. Porter L., Steers R. Organizational, Work and Personal Factors in Turnover and Absenteeism // Psychological Bulletin. 1973. Vol. 80, no. 2. P. 151–176.
2. Review and Conceptual Analysis of the Employee Turnover Process / W. Mobley, R.W. Griffeth, H. Hand, V. Meglino // Psychological Bulletin. 1979. Vol. 86, no. 3. P. 493–522.
3. Кадырова А.Р. Текучесть кадров: обзор проблемы. Ч. 1. Экономико-математические модели текучести высшего руководства // Проблемы управления. 2015. № 2. С. 2–12.
4. Кадырова А.Р. Текучесть кадров: обзор проблемы. Ч. 2. Экономико-математические модели текучести неруководящих сотрудников // Проблемы управления. 2015. № 3. С. 2–11.
5. Lewin J., Sager J. The influence of personal characteristics and coping strategies on salespersons' turnover intentions // Journal of Personal Selling & Sales Management. 2010. no. 4. P. 355–370.
6. Кисляков С.В. Применение методов теории оптимального управления в регулировании количества рабочих мест на рынке труда // Экономика. Право. Печать. Вестник КСЭИ. 2012. № 3-4 (55-56). С. 174–176.
7. Семенчин Е.А., Зайцева И.В. Математическая модель самоорганизации рынка труда для нескольких отраслей экономики // Экономика и математические методы. 2007. Т. 43, № 1. С. 12–22.
8. Gorbunov D.L. Modeling of a closed mono-branch labor market conditions // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика» = Perm University Herald. Economy. 2018. Т. 13, № 3. С. 357–371. DOI: 10.17072/1994-9960-2018-3-357-371
9. Горбунов Д.Л., Федосеев С.А. Модель управления конъюнктурой рынка труда предприятия в виде интегрируемой в квадратурах системы нелинейных дифференциальных уравнений // Прикладная математика и вопросы управления. 2019. № 4. С. 90–101. DOI: 10.15593/2499-9873/2019.4.06
10. Горбунов Д.Л. Оптимальное управление рынком труда при ограничениях в виде интегрируемой в квадратурах конечномерной системы нелинейных дифференциальных уравнений // Прикладная математика и вопросы управления. 2023. № 2. С. 83–92. DOI: 10.15593/2499-9873/2023.2.08
11. The Control Handbook: Control System Advanced Methods / Ed. W.S. Levine. Boca-Raton; London; New York: CRC Press, 2010. 942 p.
12. Рагимов А.Б. Решение задач оптимального управления при кусочно-постоянных, кусочно-линейных и кусочно-заданных на классе функций управляющих воздействий // Проблемы управления. 2015. № 2. С. 13–23.
13. Айда-заде К.Р., Рагимов А.Б. О решении задач оптимального управления на классе кусочно-постоянных функций // Автоматика и вычислительная техника. 2007. Т. 41, № 1. С. 27–36.

14. Алексеев А.О., Тихомиров В.М., Фомин С.В. Оптимальное управление. М.: Физматлит, 2005. 384 с.
15. Федосеев С.А., Горбунов Д.Л. Модель прогнозирования муниципального рынка труда // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 3. С. 163–171. DOI: 10.14529/ctcr220315
16. Gorbunov D.L., Fedoseev S.A., Eltsova M.N. System-Dynamic Model for Forecasting Municipal Labour Market Development // 2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). 2022. P. 296–300. DOI: 10.1109/SUMMA57301.2022.9974101
17. Cai X. Canonical Coin Systems for Change-Making Problems // Proceedings of the Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems. 2009. P. 499–504. DOI: 10.1109/HIS.2009.103
18. Численность населения посёлка Сылва Пермского района Пермского края. URL: <https://bdex.ru/naselenie/permskiy-kray/n/permskiy/sylva/> (дата обращения: 13.12.2023).
19. АО «Продо птицефабрика Пермская». URL: <https://заводы.рф/factory/prodo-pticefabrika-permskaya> (дата обращения: 13.12.2023).

References

1. Porter L., Steers R. Organizational, Work and Personal Factors in Turnover and Absenteeism. *Psychological Bulletin*. 1973;80(2):151–176.
2. Mobley W, Griffeth R.W., Hand H., Meglino B. Review and Conceptual Analysis of the Employee Turnover Process. *Psychological Bulletin*. 1979;86(3):493–522.
3. Kadyrova A. R. [Staff turnover: an overview of the problem. Part 1. Economic and mathematical models of senior management turnover]. *Control sciences*. 2015;2:2–12. (In Russ.)
4. Kadyrova A.R. [Staff turnover: an overview of the problem. Part 2. Economic and mathematical models of turnover of non-managerial employees]. *Control sciences*. 2015;3:2–11. (In Russ.)
5. Lewin J., Sager J. The influence of personal characteristics and coping strategies on salespersons' turnover intentions. *Journal of Personal Selling & Sales Management*. 2010;4:355–370.
6. Kislyakov S. V. [Application of optimal management theory methods in regulating the number of jobs in the labor market]. *Economy. Right. Print. Bulletin of the CSEI*. 2012;3-4(55-56):174–176. (In Russ.)
7. Seminichin E.A., Zaytseva I.V. [A mathematical model of self-organization of the labor market for several sectors of the economy]. *Economics and mathematical methods*. 2007;43(1):12–22. (In Russ.)
8. Gorbunov D.L. Modeling of a closed mono-branch labor market conditions. *Vestnik Permskogo universiteta. Seria Ekonomika = Perm University Herald. Economy*. 2018;13(3):357–371. DOI: 10.17072/1994-9960-2018-3-357-371
9. Gorbunov D.L., Fedoseev S.A. The model of control labor market conditions company as a integrability in quadratures system of nonlinear differential equations. *Applied mathematics and control sciences*. 2019;4:90–101. (In Russ.) DOI: 10.15593/2499-9873/2019.4.06
10. Gorbunov D.L. Optimal labor market management under constraints in the form of a finite-dimensional system of nonlinear differential equations integrated by quadratures. *Applied mathematics and control sciences*. 2023;2:83–92. (In Russ.) DOI: 10.15593/2499-9873/2023.2.08
11. Levine W.S. (Ed.). *The Control Handbook: Control System Advanced Methods*. Boca-Raton; London; New York: CRC Press; 2010. 942 p.
12. Ragimov A.B. [Solving optimal control problems with piecewise constant, piecewise linear and piecewise set control actions on a class of functions]. *Control Sciences*. 2015;2:13–23. (In Russ.)
13. Ayda-zade K.R., Ragimov A.B. [On solving optimal control problems in the class of piecewise constant functions]. *Automation and Computer Engineering*. 2007;41(1):27–36. (In Russ.)
14. Alekseev A.O., Tikhomirov V.M., Fomin S.V. *Optimal'noe upravlenie* [Optimal control]. Moscow: Fizmatlit; 2005. 384 p. (In Russ.)
15. Fedoseev S.A., Gorbunov D.L. Forecasting model municipal labor market. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(3):163–171. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220315
16. Gorbunov D.L., Fedoseev S.A., Eltsova M.N. System-Dynamic Model for Forecasting Municipal Labour Market Development. In: *2022 4th International Conference on Control Systems*,

Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). 2022. P. 296–300. DOI: 10.1109/SUMMA57301.2022.9974101

17. Cai X. Canonical Coin Systems for Change-Making Problems. In: *Proceedings of the Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems*. 2009. P. 499–504. DOI: 10.1109/HIS.2009.103

18. *Chislennost' naseleniya poselka Sylva Permskogo rayona Permskogo kraya* [The population of the village. Sylva of Permsky district of Perm Krai]. (In Russ.) Available at: <https://bdex.ru/naselenie/permskiy-kрай/n/permskiy/sylva/> (accessed 13.12.2023)

19. *АО “Prodo ptitsefabrika Permskaya”* [JSC “Prodo Ptitsefabrika Permskaya”]. (In Russ.) Available at: <https://zavody.rf/factory/prodo-pticefabrika-permskaya/> (accessed 13.12.2023).

Информация об авторах

Федосеев Сергей Анатольевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; fsa@gelicon.biz.

Горбунов Даниил Львович, аспирант кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; call-of-monolit@yandex.ru.

Information about the authors

Sergey A. Fedoseev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics Department, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; fsa@gelicon.biz.

Daniil L. Gorbunov, Postgraduate Student of the Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics Department, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; call-of-monolit@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 15.12.2023

The article was submitted 15.12.2023

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

1. **Тематика.** В журнале публикуются статьи по следующим научным направлениям: управление в различных отраслях техники, а также в административной, коммерческой и финансовой сферах; математическое, алгоритмическое, программное и аппаратное обеспечение компьютерных технологий, в том числе компьютерных комплексов, систем и сетей; измерительные системы, приборостроение, радиоэлектроника и связь.

2. Структура статьи:

До основного текста статьи приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- тип статьи: научная, обзорная, дискуссионная, персоналии, рецензия, краткое сообщение и т. п.;
- УДК;
- название (не более 12–15 слов);
- основные сведения об авторе (авторах):
 - имя, отчество, фамилия автора (полностью);
 - наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), где работает или учится автор;
 - электронный адрес автора (e-mail);
 - открытый идентификатор ученого (ORCID) при наличии в форме электронного адреса в сети Интернет;
- аннотация (200–250 слов),
- ключевые слова (словосочетания);
- благодарности (при наличии).

Основной текст статьи может состоять из следующих частей:

- введение;
- текст статьи (структурированный по разделам). Допускается деление основного текста статьи на тематические рубрики и подрубрики. Надписи и подписи к иллюстрированному материалу приводят на языке текста статьи и повторяют на английском языке;

- заключение.

После основного текста статьи приводят:

- Список литературы (в порядке цитирования, по ГОСТ Р 7.0.5–2008 для затекстовых библиографических ссылок);
- References (составляется согласно Vancouver Style, при транслитерации используется стандарт BGN), doi предпочтительнее приводить в форме электронного адреса в сети Интернет.

Приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- дополнительные сведения об авторе (авторах): фамилия, имя, отчество автора (полностью), ученая степень, ученое звание, должность, наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), e-mail, ORCID;
- сведения о вкладе каждого автора, указание об отсутствии или наличии конфликта интересов;
- даты поступления статьи в редакцию, одобрения после рецензирования, принятия статьи к опубликованию.

3. **Параметры набора:** шрифт – Times New Roman, кегль – 14, интервал между абзацами 0 пт, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание – по ширине.

4. **Формулы.** Набираются в редакторе формул MathType либо Microsoft Equation с отступом 0,7 см от левого края. Размер обычных символов – 11 пт, размеры индексов первого порядка – 71 %, индексов второго порядка – 58 %. Номер формулы размещается за пределами формулы, непосредственно после нее, в круглых скобках.

5. **Рисунки и таблицы.** Рисунки имеют разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруются и имеют названия (Рис. 1. Здесь следует название рисунка). Таблицы нумеруются и имеют названия (Таблица 1. Здесь следует название таблицы).

6. **Адрес редакционной коллегии.** 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, корп. 3б, 4-й этаж – Высшая школа электроники и компьютерных наук, отв. секретарю Захарову В.В. Адрес электронной почты ответственного секретаря журнала: zakharovvv@susu.ru.

7. **Подробные требования к оформлению.** Полную версию требований к оформлению статей и пример оформления можно загрузить с сайта журнала <http://vestnik.susu.ru/ctcr>.

8. Плата за публикацию рукописей не взимается.

СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДАНИИ

Журнал «Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» основан в 2001 году.

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Главный редактор – д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ Логиновский Олег Витальевич.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-57366 выдано 24 марта 2014 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки); 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки); 2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки).

Подписной индекс 29008 в объединенном каталоге «Пресса России».

Периодичность выхода – 4 номера в год.

Адрес редакции, издателя: 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, Издательский центр ЮУрГУ, каб. 32.

ВЕСТНИК
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия
«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»
2024. Том 24, № 1

16+

Редактор *С.И. Уварова*
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 24.01.2024. Дата выхода в свет 31.01.2024. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 12,55. Тираж 500 экз. Заказ 6/19. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.