

ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2022
Т.22, № 4

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:

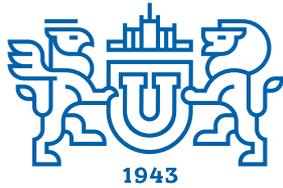
- Автоматизированные системы управления в энергосбережении
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами
- Антенная техника
- Инфокоммуникационные технологии
- Информационно-измерительная техника
- Навигационные приборы и системы
- Радиотехнические комплексы
- Системы автоматизированного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

2022

Vol. 22, no. 4

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;

Shchepkin 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

- АНАНЬЕВ А.В., БАРКАЛОВ С.А., ИВАННИКОВ К.С., МОИСЕЕВ С.И. Модели достоверности комплексного контроля состояний в пространственно-распределенных системах информационной безопасности 5
- КОПОТЕВА А.В., КАБИОЛЬСКИЙ Е.В. Оптимизация алгоритмов в головоломке Human Resource Machine по числу команд и операций 16
- БЕЛОУСОВ В.Е., ДОРОФЕЕВ Д.В., МОЖАРОВА Л.А. Моделирование автоматизированных информационных систем на основе вероятностных автоматов с блокировкой обслуживания 27

Управление в технических системах

- ПАНФЕРОВ В.И., ПАНФЕРОВ С.В., ХАЮТИН А.М., ТРЕНИН Н.А. О различии показаний истинной воздушной скорости механическим указателем и системой воздушных сигналов 38

Инфокоммуникационные технологии и системы

- ДАРОВСКИХ С.Н., ФОМИН Д.Г., ДУДАРЕВ Н.В., КЛЫГАЧ Д.С., ВАХИТОВ М.Г. Экспериментальное исследование полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной технологии 48

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

- ЯПАРОВ Д.Д., ШЕСТАКОВ А.Л. Метод восстановления входного сигнала в динамических системах на основе дискретной модели с исключением корректирующих обратных связей 56
- ДМИТРИЕВ В.М., ГЕМБУХ Л.А., САХАБУТДИНОВ А.Е. Реализация виртуального осциллографа на базе микроконтроллера STM32 67

Управление в социально-экономических системах

- ЛОГИНОВСКИЙ О.В., ГИЛЁВ Д.В. Модификации алгоритмов автоматизированной системы управления диагностикой 76
- ПЕРЕВАЛОВА О.С., БАРКАЛОВ С.А., БАЛАШОВА Н.А. Оптимизация процедуры наставничества в организационных системах 85
- PODPOVETNAYA Yu.V., NAJMIDDINOV A.M., OVSYANITSKAYA L.Yu., PODPOVETNY A.D. Model of project management in the digital educational environment of the university 96
- KULIKOV G.G., GINDULLINA T.K., KAPUSTIN V.N., DEMCHENKO M.S., NABIEV R.R. Applying the theory of business processes re-engineering within the creation of the uniform information space of the enterprise 109

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

- ЛЮТОВ А.Г., НОВОЖЕНИН М.Б., ШЕВЦОВ И.К. Моделирование динамических процессов при прецедентном управлении автоматизированным насосным комплексом с учетом канала байпаса 119

Краткие сообщения

- ПЛЕХОВ П.В., ЗАТОНСКИЙ А.В., ДОЛГОПОЛОВ И.С. Компьютерное моделирование тросовой грозозащиты двухцепной ЛЭП класса напряжения 110 кВ в Simulink 131
- БОЛОДУРИНА И.П., БОРЩУК Е.Л., ВОРОБЬЕВ И.Г., ГРИШИНА Л.С. Количественная оценка влияния пандемии на динамику численности населения Оренбургской области 141
- ЛОГИНОВСКИЙ О.В., МАКСИМОВ А.А., ЗАХАРОВ В.В., ЦЕМЛЕВ М.В. Использование реляционных баз данных для организации контролируемого реверс-инжиниринга 151
- КЛЫГАЧ Д.С., ВАХИТОВ М.Г., ФОМИН Д.Г., КОРОЛЕВ А.С. Устройство для измерения диэлектрических свойств порошковых материалов на базе полосковой линии передачи 159

CONTENTS

Informatics and computer engineering

- ANANIEV A.V., BARKALOV S.A., IVANNIKOV K.S., MOISEEV S.I. Reliability models of complex state control in spatially distributed information security systems 5
- KOPOTEVA A.V., KABIOLSKIY E.A. Commands amount and execution steps optimization in Human Resource Machine puzzles solution algorithms 16
- BELOUSOV V.E., DOROFEEV D.V., MOZHAROVA L.A. Application of methods of information engineering for change of structure of multilayer systems of organizational management 27

Control in technical systems

- PANFEROV V.I., PANFEROV S.V., HAYUTIN A.M., TRENIN N.A. About the difference in the indications of the true air speed by the mechanical index and the air signal system 38

Infocommunication technologies and systems

- DAROVSKIKH S.N., FOMIN D.G., DUDAREV N.V., KLYGACH D.S., VAKHITOV M.G. Experimental study of band pass filters based on multilayer technology 48

Instrument engineering, metrology and information and measuring devices and systems

- YAPAROV D.D., SHESTAKOV A.L. Method for recovery of the input signal in dynamic systems based on a discrete model with the exclusion of correcting feedbacks 56
- DMITRIEV V.M., GEMBUH L.A., Sakhabutdinov A.E. Realizing virtual oscilloscope based on the STM32 microcontroller 67

Control in social and economic systems

- LOGINOVSKIY O.V., GILEV D.V. Modifications of algorithms of the automated diagnostic management system 76
- PEREVALOVA O.S., BARKALOV S.A., BALASHOVA N.A. Optimization of the mentoring procedure in organizational systems 85
- PODPOVETNAYA Yu.V., NAJMIDDINOV A.M., OVSYANITSKAYA L.Yu., PODPOVETNY A.D. Model of project management in the digital educational environment of the university 96
- KULIKOV G.G., GINDULLINA T.K., KAPUSTIN V.N., DEMCHENKO M.S., NABIEV R.R. Applying the theory of business processes re-engineering within the creation of the uniform information space of the enterprise 109

Automated process control systems

- LUTOV A.G., NOVOZHENIN M.B., SHEVTCOV I.K. Simulation of dynamic processes during precedent control of the automated pump system taking into account the bypass channel 119

Brief reports

- PLEKHOV P.V., ZATONSKIY A.V., DOLGOPOLOV I.S. Computer simulation of cable lightning protection of 110-kV voltage double-circuit PTL by Simulink 131
- BOLODURINA I.P., BORSHCHUK E.L., VOROBYOV I.G., GRISHINA L.S. Quantitative evaluation of the pandemic impact on population dynamics of the Orenburg region 141
- LOGINOVSKIY O.V., MAKSIMOV A.A., ZAKHAROV V.V., SHCHEMLEV M.V. Using relational databases for organizations of controlled reverse engineering 151
- KLYGACH D.S., VAKHITOV M.G., FOMIN D.G., KOROLEV A.S. A device for measuring the dielectric properties of powder materials based on a stripline transmission 159

Информатика и вычислительная техника Informatics and computer engineering

Научная статья
УДК 004.056
DOI: 10.14529/ctcr220401

МОДЕЛИ ДОСТОВЕРНОСТИ КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЙ В ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

А.В. Ананьев¹, sasha303_75@mail.ru
С.А. Баркалов², barkalov@vgasu.vrn.ru
К.С. Иванников³, ivannikov_ks@radar-mms.com
С.И. Моисеев², mail@moiseevs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6136-9763>

¹ АО «Научно-производственное предприятие «Полет», Нижний Новгород, Россия

² Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

³ АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе рассматриваются широко применяемые на практике распределенные системы, предполагающие хранение, обработку критически важной для предприятий и учреждений информации на периферии, анализируется спектр уязвимостей по отношению к информационной безопасности (ИБ) предприятий, организаций, учебных заведений и т. д. В статье проведен подробный анализ применения математического аппарата теории массового обслуживания, используемого для исследований информационной безопасности распределенных систем. **Цели и задачи** поставлены по результатам проведенного анализа, который показал, что существующее соотношение «распределенная инфокоммуникационная система – угрозы ИБ» не в полной мере отражает свойство достоверности данных о состоянии ИБ для количества элементов (датчиков), участвующих в обеспечении ИБ для данной информационной системы, и количества каналов, по которым могут приходиться угрозы для данной информационной системы. Таким образом, целью данной работы является разработка математической модели, основанной на марковских случайных процессах и теории массового обслуживания, которая позволяет в динамике вероятностными методами оценить актуальность информации о возможных угрозах в области информационной безопасности и принять упреждающие меры по их ликвидации. **Материалы и методы.** В основе исследований лежит идея, заключающаяся в том, что имеется некоторая информационная система, которая может подвергаться угрозам в области информационной безопасности, угрозы могут поступать по некоторым каналам. Для математического моделирования описанной ситуации введен ряд ограничений, с учетом которых показано, что достоверность данных об информационных угрозах может быть исследована на основе марковских случайных процессов. **Результаты.** С использованием модели достоверности комплексного контроля состояний в пространственно-распределенных системах ИБ получены: зависимости вероятности достоверности информации об угрозах от интенсивности их поступления при разном количестве источников угроз; зависимости вероятности достоверности информации от времени получения и обработки информации при разном количестве источников угроз; минимальные значения элементов, которые необходимы для обеспечения с вероятностью не менее заданной, достоверности информации при известном количестве источников угроз для разных значений интенсивности их поступления и другие. **Заключение.** Полученные зависимости имеют квазилинейный характер, что позволяет проводить приближенные, но достаточно точные расчеты при оценке указанных параметров, что позволит эффективно организовывать мероприятия по ИБ. Разработанная модель позволит проводить оперативное планирование стратегии защиты информационной системы от возможных угроз, а также осуществлять поддержку принятия решений по количеству элементов ИБ в меняющихся условиях противостояния внешним информационным воздействиям.

Ключевые слова: распределенная система, информационная безопасность, теория массового обслуживания, достоверность информации

Для цитирования: Модели достоверности комплексного контроля состояний в пространственно-распределенных системах информационной безопасности / А.В. Ананьев, С.А. Баркалов, К.С. Иванников, С.И. Моисеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 5–15. DOI: 10.14529/ctcr220401

RELIABILITY MODELS OF COMPLEX STATE CONTROL IN SPATIALLY DISTRIBUTED INFORMATION SECURITY SYSTEMS

A.V. Ananiev¹, sasha303_75@mail.ru
S.A. Barkalov², barkalov@vgasu.vrn.ru
K.S. Ivannikov³, ivannikov_ks@radar-mms.com
S.I. Moiseev², mail@moiseevs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6136-9763>

¹ JSC Research and Production Enterprise “Polet”, Nizhny Novgorod, Russia

² Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

³ JSC Research and Production Enterprise “Radar mms”, St. Petersburg, Russia

Abstract. The paper considers distributed systems widely used in practice, which involve the storage and processing of information critical for enterprises and institutions on the periphery, analyzes the range of vulnerabilities in relation to information security (IS) of enterprises, organizations, educational institutions, etc. The article provides a detailed analysis of the application of the mathematical apparatus of the theory of queuing used to study the information security of distributed systems. **The goals and objectives** were set based on the results of the analysis, which showed that the existing ratio “distributed infocommunication system – IS threats” does not fully reflect the property of reliability of data on the state of IS for the number of elements (sensors) involved in providing IS for this information system and the number of channels through which threats to this information system can come. Thus, the purpose of this work is to develop a mathematical model based on Markov random processes and queuing theory, which allows using probabilistic methods to evaluate the relevance of information about possible threats in the field of information security in dynamics and take preventive measures to eliminate them. **Materials and methods.** The research is based on the idea that there is some information system that can be exposed to threats in the field of information security, threats can come through some channels. For mathematical modeling of the described situation, a number of restrictions are introduced, taking into account which it is shown that the reliability of data on information threats can be investigated on the basis of Markov random processes. **Results.** Using the model of reliability of complex monitoring of states in spatially distributed IS systems, the following were obtained: dependences of the probability of reliability of information about threats on the intensity of their arrival with a different number of threat sources; dependence of the probability of reliability of information on the time of receipt and processing of information with a different number of sources of threats; the minimum values of the elements, which are necessary to ensure the reliability of information with a probability not less than a given one, with a known number of threat sources for different values of the intensity of their arrival, and others. **Conclusion.** The dependences obtained are quasi-linear in nature, which makes it possible to carry out approximate, but sufficiently accurate calculations when evaluating these parameters, which will make it possible to effectively organize information security measures. The developed model will allow for operational planning of an information system protection strategy against possible threats, as well as support for decision-making on the number of information security elements in changing conditions of confronting external information influences.

Keywords: distributed system, Information Security, queuing theory, reliability of information

For citation: Ananiev A.V., Barkalov S.A., Ivannikov K.S., Moiseev S.I. Reliability models of complex state control in spatially distributed information security systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(4):5–15. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220401

Введение

Современный уровень инфокоммуникационных технологий, обеспечивающих высокоскоростную передачу по линиям связи при возможности доступа к системе через вычислительные системы, в том числе персональные, позволяет воплощать в реальность высокоэффективные распределенные системы. Основным признаком распределенных систем является отсутствие локального сосредоточения компонентов в одном физическом местоположении. Дополнительным стимулом к развитию таких распределенных систем служат эпидемиологическая обстановка, привя-

занность узких специалистов к местам постоянного проживания, локализация производственной базы, использование облачных сервисов и т. д.

В то же время на практике распределенные системы, предполагающие хранение, обработку критически важной для предприятий и учреждений информации на периферии, открывают целый спектр уязвимостей по отношению к информационной безопасности (ИБ) предприятий, организаций, учебных заведений и т. д. [1]. В связи с этим одновременно со стремительной информатизацией общества, промышленности и экономики на первое место выходят проблемы информационной безопасности в распределенных системах самого различного назначения [2–4], которые могут свести «на нет» любые перспективные проекты и функционирующие системы практически в любой отрасли народного хозяйства.

В интересах получения качественных, научно обоснованных, а самое главное, *своевременных* организационных и технических решений по обеспечению безопасности информации в распределенных системах широкое применение находит математический аппарат теории массового обслуживания (ТМО), обзор которых проведен далее по тексту. В работах [5, 6] с использованием ТМО решаются задачи построения моделей мониторинга систем обработки данных по показателям информационной безопасности. Получены соотношения для наиболее важных характеристик указанных систем, в частности, вероятности числа не выявленных вызовов в моменты окончания обслуживания. В работе [7] исследуется технология «Умный дом», а именно проводится сравнение обработчиков данных по показателю среднего времени обработки запросов в зависимости от объема базы знаний экспертной системы. По результатам исследований получены функциональные зависимости количества запросов в очереди и времени ожидания очереди от общего количества запросов за некоторый интервал времени. В работе [8] исследуются вопросы временных затрат на время подготовки системы информационной безопасности к функционированию, включающему аутентификацию пользователя, установление соединения с базой данных, дешифрование данных, кэширование при запросах к базе данных, загрузку виртуальных машин и т. д.

Наиболее близкими по смыслу и содержанию к исследованию авторов являются работы, в которых при анализе угроз с использованием СМО определяется их актуальность, в том числе учитываются разнородные угрозы [9, 10]. В некоторых работах осуществлена привязка к реальным протоколам, например, протоколу установления сессий (Session Initiation Protocol, SIP) между двумя пользователями с одним межсетевым экраном по пути следования сигнальных сообщений [11]. В ряде исследований эффект от действий злоумышленника представлен в виде снижения интенсивности обработки заявок пользователей и повышения интенсивности обработки заявок на нарушение доступа [8, 12].

Цели и задачи

Одновременно анализируя использование теории СМО в сфере ИБ и существующее соотношение «распределенная инфокоммуникационная система – угрозы ИБ», можно сделать вывод о том, что остается не в полной мере исследованным свойство достоверности данных о состоянии ИБ для определенного количества элементов (датчиков) N , участвующих в обеспечении ИБ для данной информационной системы, а также для количества каналов M , по которым могут приходить угрозы для данной информационной системы. В свою очередь *достоверность* данных о ИБ инфокоммуникационной системы в первую очередь определяется устареванием информации о типах, видах и направлениях существующих информационных угроз.

Ввиду вышесказанного в данной работе предлагается математическая модель оценки эффективности проведения мероприятий по ликвидации информационных угроз для некоторой организации. В основе модели ставится цель в получении и передаче информации о возможных информационных угрозах на самых различных уровнях в условиях длительного времени. Под информационными угрозами следует понимать как отдельные частные кибератаки, приходящие от отдельных источников, так и любые долгосрочные проекты, связанные с уменьшением информационной безопасности.

Таким образом, целью данной работы является разработка математической модели, основанной на марковских случайных процессах и теории массового обслуживания, которая позволяет в динамике вероятностными методами оценить актуальность информации о возмож-

ных угрозах в области информационной безопасности и принять упреждающие меры по их ликвидации.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1) разработать математическую модель, позволяющую оценить вероятность того, что информация о возможных информационных угрозах актуальна, или провести оценку доли актуальной информации о возможных информационных угрозах;

2) получить численное решение для основных параметров, характеризующих степень актуальности информации об информационных угрозах;

3) проанализировать полученные решения, дать рекомендации по эффективной организации мероприятий, связанной с ликвидацией угроз в области информационной безопасности.

Математическая постановка задачи

В ее основе будет лежать идея, заключающаяся в том, что имеется некоторая информационная система, которая может подвергаться угрозам в области информационной безопасности, угрозы могут поступать по M каналам. Данная система имеет защиту от возможных угроз, которая содержит N элементов. При обнаружении угрозы по какому-либо каналу каждый элемент ИБ собирает информацию об угрозе и в течении какого-то времени обрабатывает ее, вследствие чего принимается решение о ликвидации угрозы. Для математического моделирования описанной ситуации введем следующие допущения.

1. Источник информационной угрозы заранее не известен, и процесс обнаружения угрозы каналом ИБ является случайным. При этом поток событий, заключающихся в обнаружении угрозы с получением и обработкой информации о нем, рационально считать потоком Пуассона [13, 14].

2. Учитывая динамичность внешних воздействий на информационную систему, рационально предположить, что информация, полученная о каждой обнаруженной угрозе, остается актуальной лишь некоторое время, после чего она устаревает и необходимо вновь получать актуальную информацию об источнике угрозы. Учитывая пуассоновский поток обнаружения информационных угроз, можно предположить, что поток событий, заключающихся в потерях актуальности информации об угрозе, также будет являться потоком Пуассона.

3. Процесс обеспечения ИБ информационной системы длится достаточно длительное время для того, чтобы случайный процесс, его описывающий, перешел в стационарный режим.

С учетом подобных допущений можно моделировать достоверность данных об информационных угрозах на основе марковских случайных процессов [13, 15].

Введем следующие обозначения:

N – количество элементов (датчиков), участвующих в обеспечении ИБ для данной информационной системы;

M – количество каналов, по которым могут приходиться угрозы для данной информационной системы;

λ – интенсивность обнаружения, получения и успешной обработки информации об одной угрозе, интенсивность получения информации об угрозах для информационной системы согласно теореме о сложении потоков событий [15] будет равна $N\lambda$;

T_a – среднее время сохранения актуальности информации об обнаруженной угрозе, если каналы, по которым возможно ее поступление, разные, то это средневзвешенное время, рассчитанное на основе времени актуальности информации, для каждого канала пропорционально их количеству;

T_n – среднее время обработки информации об угрозе до момента ее ликвидации.

На основании двух последних параметров можно определить интенсивность потери актуальной информации для одного канала:

$$\mu = \frac{1}{T_a - T_n}.$$

Указанные параметры служат исходными данными для построения модели достоверности комплексного контроля состояний в пространственно-распределенных системах ИБ.

**Модели достоверности комплексного контроля состояний
в пространственно-распределенных системах ИБ**

Перейдем к модели, основанной на случайных марковских процессах. Введем следующие состояния: S_k – состояние, когда имеется актуальная информация о k каналах, $k = 0, 1, \dots, M$. Тогда процесс получения и устаревания информации для этих каналов можно смоделировать марковским процессом гибели и размножения [15], граф состояний которого приведен на рис. 1.

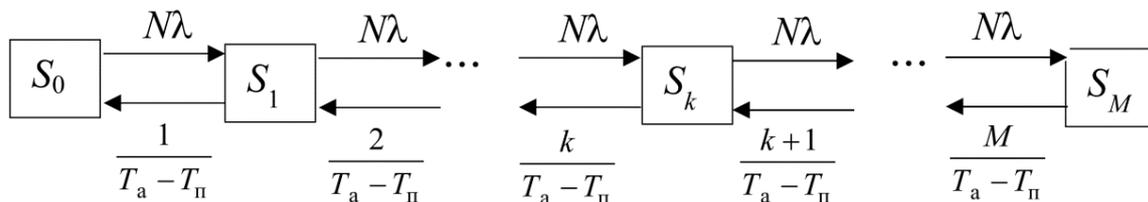


Рис. 1. Граф состояний процесса получения и устаревания информации
Fig. 1. Graph of the states of the process of obtaining and obsolescence of information

Определим вероятности состояний P_k , имеющие смысл вероятности того, что в произвольный момент времени имеется актуальная информация о k каналах, из которых возможны угрозы, $k = 0, 1, \dots, M$. Для этого находим вероятность отсутствия информации для всех каналов:

$$P_0 = \left[\sum_{m=0}^M \frac{(N\lambda(T_a - T_n))^m}{m!} \right]^{-1}, \tag{1}$$

а затем вероятности всех оставшихся состояний:

$$P_k = \frac{[N\lambda(T_a - T_n)]^k}{k!} P_0 = \frac{[N\lambda(T_a - T_n)]^k}{k! \sum_{m=0}^M \frac{(N\lambda(T_a - T_n))^m}{m!}}, \quad k = 0, 1, \dots, M. \tag{2}$$

Как было сказано ранее, будем считать информацию достоверной, если информация о всех M каналах поступления угроз является актуальной. Вероятность этого равна

$$P_M = \frac{[N\lambda(T_a - T_n)]^M}{M! \cdot \sum_{m=0}^M \frac{(N\lambda(T_a - T_n))^m}{m!}}. \tag{3}$$

Проанализируем полученные вероятности получения достоверной информации в зависимости от интенсивности обнаружения, получения и обработки достоверной информации об угрозах. Это связано с тем, что вероятность получения достоверной информации P_M можно интерпретировать как некоторый показатель полной информационной защищенности: чем выше вероятность обнаружения и обработки актуальной информации о всех возможных угрозах, тем выше значения критерия защищенности информационной системы. С другой стороны, интенсивность обнаружения, получения и успешной обработки информации об угрозах одним элементом ИБ λ может служить показателем своевременности получения информации об угрозах: скорость обнаружения угроз по всем возможным каналам напрямую влияет на поддержание имеющейся информации на актуальном уровне и обеспечение ИБ.

На рис. 2 представлены графики зависимости вероятности достоверности информации об угрозах P_M от интенсивности λ .

Как видим из рис. 2, достоверность информации сильно зависит от скорости (интенсивности) обнаружения информационных угроз, а также от количества необходимых для полного контроля ситуации при принятии решений числа элементов системы ИБ.

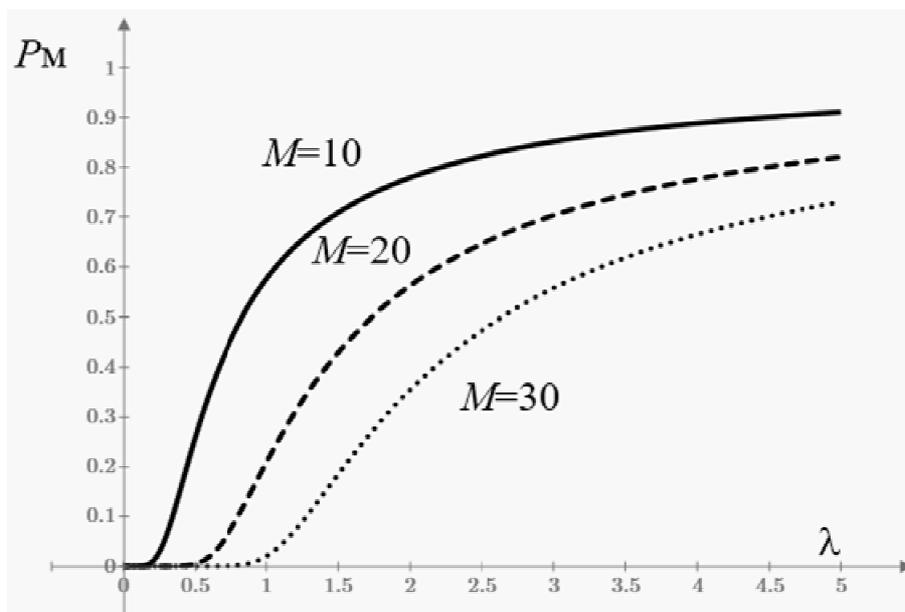


Рис. 2. Зависимость вероятности достоверности информации об угрозах от интенсивности λ при разном количестве источников угроз ($N = 12$, $T_a = 2$ ч, $T_n = 10$ мин)

Fig. 2. Dependence of the probability of reliability of information about threats on the intensity λ for a different number of sources of threats ($N = 12$, $T_a = 2$ h, $T_n = 10$ min)

Второй составляющей служит время обработки полученной информации до момента принятия решений на ликвидацию угрозы T_n . Не меньшую роль играет время актуальности информации T_a , но этот параметр является экзогенным и им управлять невозможно. Приведем зависимость вероятности достоверности информации от времени передачи информации T_n и от количества источников информационных угроз, который приведен на рис. 3.

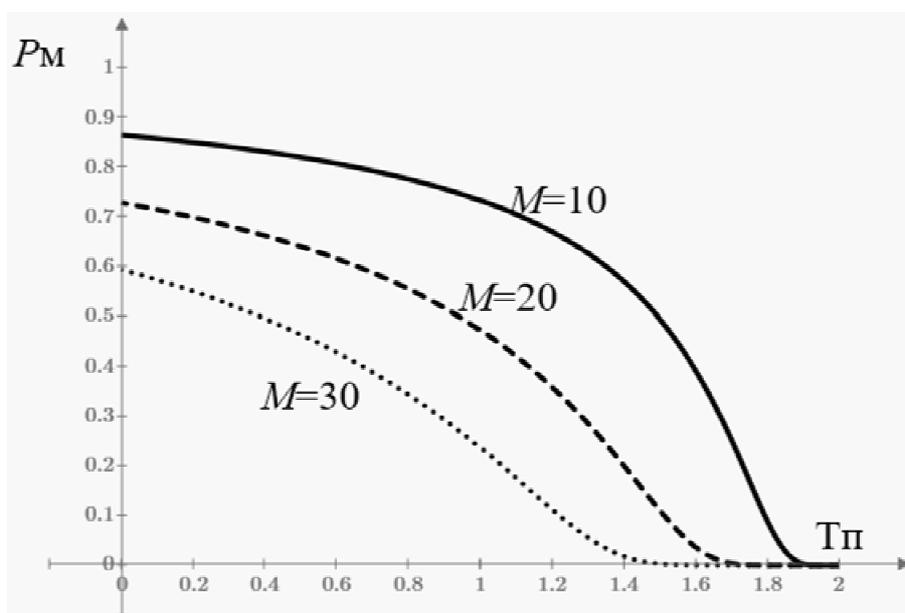


Рис. 3. Зависимость вероятности достоверности информации от времени получения и обработки информации T_n (ч) при разном количестве источников угроз ($\lambda = 3$, $N = 12$, $T_a = 2$ ч)

Fig. 3. Dependence of the probability of information reliability on the time of receipt and processing of information T_n (h) with a different number of threat sources ($\lambda = 3$, $N = 12$, $T_a = 2$ h)

Закономерно достоверность информации падает при росте времени получения и обработки информации и количества источников информационных угроз.

На основании модели (3) можно рассчитать минимальное количество элементов защиты информационной системы от возможных угроз $N_{кр}$, которое необходимо использовать для того, чтобы с вероятностью не менее $P_{кр}$ поддерживать в актуальном состоянии информацию о M источниках угроз. Для этих целей необходимо решать трансцендентное уравнение относительно параметра $N_{кр}$ вида

$$\frac{[\lambda(T_a - T_{II})\text{floor}(N_{кр})]^M}{M! \cdot \sum_{m=0}^M \frac{(\lambda(T_a - T_{II})\text{floor}(N_{кр}))^m}{m!}} = P_{кр}, \quad (4)$$

где функция $\text{floor}(x)$ округляет аргумент до ближайшего меньшего целого.

Результаты решения (4) позволят планировать количество элементов системы ИБ, которое необходимо использовать для получения достоверной информации для заданного числа источников информационных угроз так, чтобы имелась актуальная информация о всех возможных угрозах с заданной вероятностью. Зависимость минимального количества элементов ИБ N , которое необходимо для обеспечения с вероятностью не менее $P_{кр} = 0,9$ достоверности информации при M источниках угроз при разных интенсивностях получения новой информации λ о них, представлена на рис. 4.

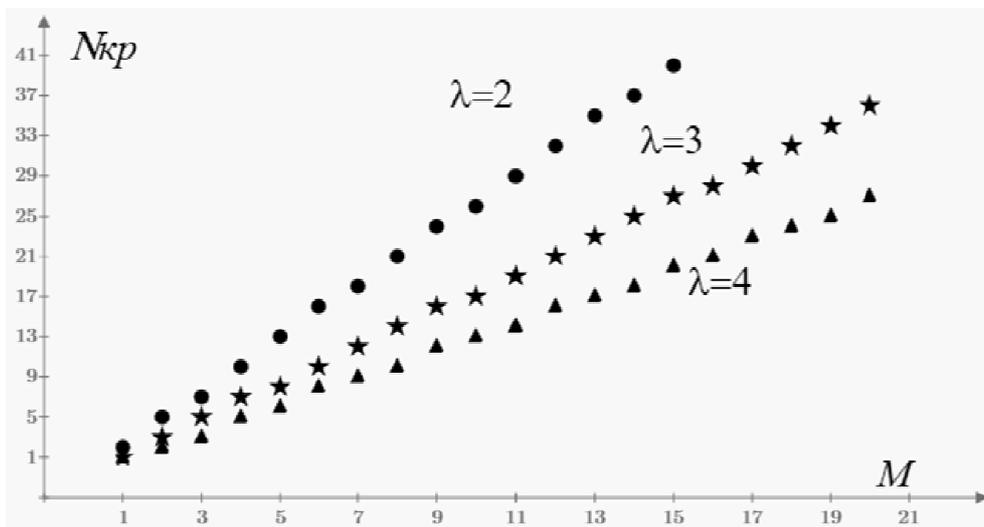


Рис. 4. Минимальное количество элементов ИБ N , которое необходимо для обеспечения с вероятностью не менее $P_{кр} = 0,9$ достоверности информации при M источниках угроз при разных интенсивностях λ ($N = 12$, $T_a = 2$ ч, $T_{II} = 10$ мин)

Fig. 4. The minimum number of IS elements N , which is necessary to ensure, with a probability of at least $P_{кр} = 0.9$, the reliability of information with M sources of threats at different intensities λ ($N = 12$, $T_a = 2$ h, $T_{II} = 10$ min)

Как видно из рис. 4, зависимость $N(M)$ практически линейная, что позволит получать аналитические зависимости методами регрессионного анализа.

Рассмотрим теперь обратную задачу: определим минимальную интенсивность обнаружения, получения и успешной обработки информации об одной угрозе одним элементом ИБ $\lambda_{кр}$, которые напрямую определяют своевременность мероприятий по ликвидации информационных угроз, от минимальной вероятности поддержания актуальной информации о возможных угрозах и, как следствие, достоверности информации $P_{кр}$. Для решения этой задачи также необходимо решать уравнение относительно параметра $\lambda_{кр}$ вида

$$\frac{[N\lambda_{кр}(T_a - T_{II})]^M}{M! \cdot \sum_{m=0}^M \frac{(N\lambda_{кр}(T_a - T_{II}))^m}{m!}} = P_{кр}. \quad (5)$$

На рис. 5 приведены зависимости минимальной интенсивности обнаружения, получения и успешной обработки информации об угрозе одним элементом ИБ $\lambda_{кр}$, которые обеспечивают достоверность информации с вероятностью $P_{кр}$ от значения этой вероятности.

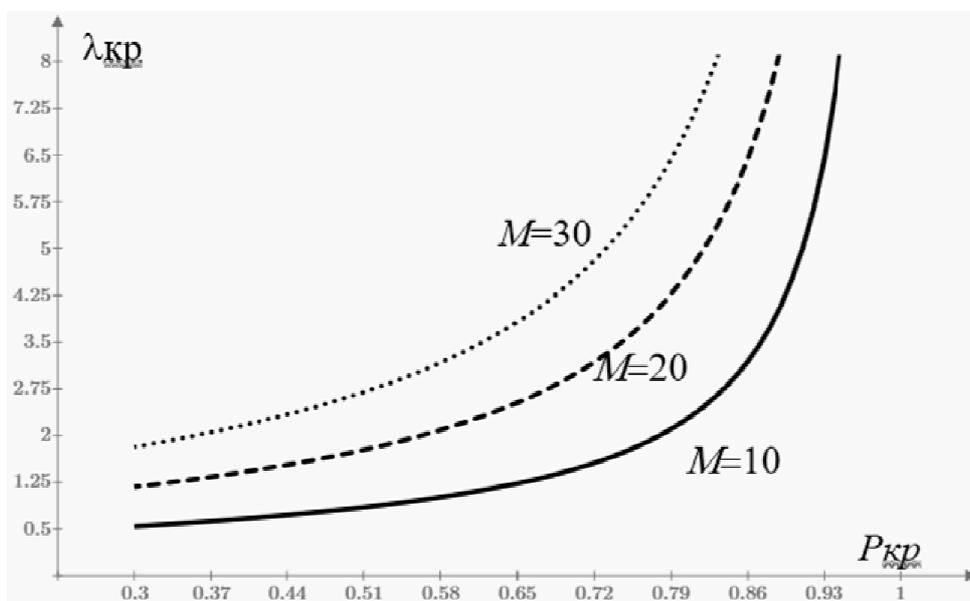


Рис. 5. Зависимости минимальной интенсивности обнаружения, получения и успешной обработки информации об угрозе одним элементом ИБ $\lambda_{кр}$ от вероятности $P_{кр}$ ($N = 12$, $T_a = 2$ ч, $T_{п} = 10$ мин)
Fig. 5. Dependences of the minimum intensity of detection, receipt and successful processing of information about the threat by one IS element $\lambda_{кр}$ on the probability $P_{кр}$ ($N = 12$, $T_a = 2$ h, $T_{п} = 10$ min)

Для полного описания картины взаимоотношений между своевременностью и достоверностью получаемой информации об угрозах приведем зависимость между своевременностью получения и обработки информации, выраженной в единицах времени, которая имеет смысл среднего времени, необходимого на получении новой информации об информационной угрозе $T_{кр}$, которая связана с интенсивностью получения этой информации формулой $T_{кр} = 1/\lambda_{кр}$, от вероятности $P_{кр}$ обеспечения необходимой достоверности. Эта зависимость приведена на рис. 6.

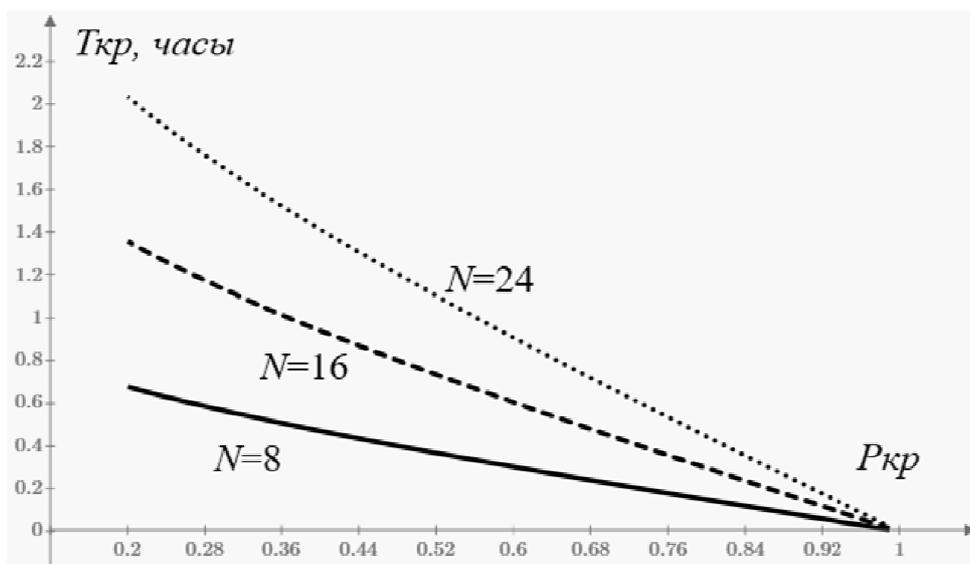


Рис. 6. Зависимости минимального времени на получение актуальной информации одним элементом ИБ $T_{кр}$ от вероятности $P_{кр}$ обеспечения необходимой достоверности ($M = 20$, $T_a = 2$ ч, $T_{п} = 10$ мин)
Fig. 6. Dependences of the minimum time for obtaining up-to-date information by one IS element $T_{кр}$ on the probability $P_{кр}$ of providing the necessary reliability ($M = 20$, $T_a = 2$ h, $T_{п} = 10$ min)

Из рис. 6 видно, что данная зависимость является близкой к линейной и на практике ее можно получать методами регрессионного анализа.

Заключение

Полученные зависимости также имеют квазилинейный характер, что позволит проводить приближенные, но достаточно точные расчеты при оценке указанных параметров.

Таким образом, представленная модель позволит проводить оперативное планирование стратегии защиты информационной системы от возможных угроз [16], а также осуществлять поддержку принятия решений по количеству элементов ИБ в меняющихся условиях противостояния внешним информационным воздействиям.

Список литературы

1. Андреев Н.О. Современные проблемы безопасности корпоративных сетей // Прикладная информатика. 2008. № 1 (13). С. 25–31.
2. Вотинов, М.В. Обеспечение систем автоматического управления современными информационными средствами удаленного доступа и мобильного контроля. Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2017. Т. 17, № 2. С. 141–148. DOI: 10.14529/ctcr170213
3. Сергеева Т.А., Хазимов М.В. Информационная безопасность при обмене технологической информацией для осуществления функций телеуправления в энергетике // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. 2017. С. 292–295.
4. Лукашев В.М. Защита конечных ресурсов КИС с использованием интеллектуальных систем безопасности // Защита информации. Инсайд. 2006. № 2 (8). С. 27–29.
5. Моделирование процесса мониторинга систем информационной безопасности на основе систем массового обслуживания / Г.А. Попов, С.Ж. Симаворян, А.Р. Симонян, Е.И. Улитина // Информатика и ее применения. 2020. Т. 14, № 1. С. 71–79. DOI: 10.14357/19922264200110
6. Красножон Ю.Г. Математическая модель как средство оптимизации системы автоматизации процесса управления инцидентами информационной безопасности // Безопасность информационных технологий. 2018. Т. 25, № 1. С. 99–107.
7. Еременко В.Т., Лякишев А.А. Оптимизация процессов информационного обмена в системе безопасности и мониторинга АСУЗ на примере технологии «Умный дом» // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2017. № 7. С. 146–151. DOI: 10.12737/article_5940f01a8d60b0.87715921
8. Модель оценивания оперативности облачных вычислений с учетом виртуализации и обеспечения информационной безопасности / С.Е. Адагуров, С.В. Калинин, В.А. Лохвицкий и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 9-1. С. 233–245.
9. Щеглов К.А., Щеглов А.Ю. Интерпретация и моделирование угрозы атаки на информационную систему. Часть 1. Моделирование угрозы уязвимости и интерпретация угрозы атаки // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 12. С. 930–940.
10. Распределенная информационно-диагностическая система управления технологическим процессом / С.А. Манцеров, К.В. Ильичев, А.М. Бремзен, В.О. Балашов // Международный студенческий научный вестник. 2017. № 6. С. 92.
11. Самуйлов К.Е., Ботвинко А.Ю., Зарипова Э.Р. Оценка времени установления сессии между пользователями при наличии межсетевых экранов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Математика, информатика, физика. 2016. № 1. С. 59–66.
12. Подход к анализу состояния информационной безопасности беспроводной сети / Н.А. Бажаев, А.Е. Давыдов, И.Е. Кривцова и др. // Прикладная информатика. 2016. Т. 11, № 6 (66). С. 121–128.
13. Алексеев О.Г., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Марковские модели боя. М.: МО СССР, 1985. 85 с.
14. Козлитин С.Н., Козирацкий Ю.Л., Будников С.А. Моделирование совместного применения средств радиоэлектронной борьбы и огневого поражения в интересах повышения эффективности борьбы за превосходство в управлении // Системы управления, связи и безопасности. 2020;(1):49–73. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-00001

15. Вентцель Е.С. Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Высш. шк., 1998. 354 с.
16. Надеждин Е.Н., Роганов А.А. Параметрический синтез системы активного мониторинга корпоративной вычислительной сети // *Современные наукоемкие технологии*. 2020. № 10. С. 67–61. DOI: 10.17513/snt.38255

References

1. Andreev N.O. [Modern problems of security of corporate networks]. *Journal of Applied Informatics*. 2008;1(13):25–31. (In Russ.)
2. Votinov M.V. The Equipment of Automatic Systems with Modern Remote Access and Mobile Control. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2017;17(2):141–148. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr170213
3. Sergeeva T.A., Khazimov M.V. [Information security in the exchange of technological information for the implementation of telecontrol functions in the energy sector]. In: *Power industry through the eyes of youth – 2017. Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference*. 2017. P. 292–295. (In Russ.)
4. Lukashev V.M. [Protection of the end resources of the KIS using intelligent security systems]. *Zašita informacii. Inside*. 2006;2(8):27–29. (In Russ.)
5. Popov G.A., Simavoryan S.Zh., Simonyan A.R., Ulitina E.I. Modeling of monitoring of information security process on the basis of queuing systems. *Informatics and Applications*. 2020;14(1):71–79. (In Russ.) DOI: 10.14357/19922264200110
6. Krasnozhon Yu.G. Mathematical model as means of optimization of the automation system of the process of incidents of information security management. *Bezopasnost' Informatsionnykh Tekhnologiy*. 2018;25(1):99–107. (In Russ.)
7. Eremenko V.T., Lyakishev A.A. [Optimization of information exchange processes in the system of security and monitoring of the BMS on the example of the technology “Smart House”]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017;(7):146–151. (In Russ.) DOI: 10.12737/article_5940f01a8d60b0.87715921
8. Adadurov S.E., Kalinichenko S.V., Lohvitsky V.A., Khomonenko A.D., Yakovlev V.V. Model for estimation of the operativity of cloud computing with the account of virtualization and security. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki = Izvestiya Tula State University. Technical science*. 2017;9-1:233–245. (In Russ.)
9. Shcheglov K.A., Shcheglov A.Yu. Informational system attack threat modeling and interpretation. Part 1. Vulnerability threat modeling and attack threat interpretation. *Information technologies = Informacionnye tehnologii*. 2015;21(12):930–940. (In Russ.)
10. Mantserov S.A., Il'ichev K.V., Bremzen A.M., Balashov V.O. Distributed information-diagnostic process control system. *International Student Scientific Bulletin*. 2017;(6):92. (In Russ.)
11. Samouylov K.E., Botvinko A.Yu., Zaripova E.R. Session setup time estimation in the network with a firewall. *Bulletin of Peoples' friendship university of Russia. Series: Mathematics. Information sciences. Physics*. 2016;(1):59–66. (In Russ.)
12. Bazhaev N.A., Davydov A.E., Krivtsova I.E., Lebedev I.S., Salakhutdinova K.I. The approach to the analysis of the information security wireless network status. *Journal of Applied Informatics*. 2016;11(6(66)):121–128. (In Russ.)
13. Alekseev O. G., Anisimov V. G., Anisimov E. G. *Markovskiy modeli boya* [Markov models of combat]. Moscow: Ministry of defense of the USSR; 1985. 85 p. (In Russ.)
14. Kozlitsin S.N., Koziratsky Yu.L., Budnikov S.A. Electronic warfare and fire damage means joint use modeling for improving a superiority of control struggle efficiency. *Systems of Control, Communication and Security*. 2020;(1):49–73. (In Russ.) DOI: 10.24411/2410-9916-2020-00001
15. Wentzel E.S. Ovcharov L.A. *Teoriya sluchaynykh protsessov i yeye inzhenernyye prilozheniya* [Theory of random processes and its engineering applications]. Moscow: Vysshaya shkola, 1998. 354 p. (In Russ.)
16. Nadezhdin E.N., Roganov A.A. Parametric synthesis of the active corporate computer network monitoring. *Modern high technologies*. 2020;(10):67–61. (In Russ.) DOI: 10.17513/snt.38255

Информация об авторах

Ананьев Александр Владиславович, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, АО «Научно-производственное предприятие «Полет», Нижний Новгород, Россия; sasha303_75@mail.ru.

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

Иванников Кирилл Сергеевич, директор научно-производственного комплекса «Специальное программное обеспечение», АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Санкт-Петербург, Россия; ivannikov_ks@radar-mms.com.

Моисеев Сергей Игоревич, канд. физ.-мат. наук, доц., доц. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; mail@moiseevs.ru.

Information about the authors

Alexander V. Ananiev, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, JSC Research and Production Enterprise “Polet”, Nizhny Novgorod, Russia; sasha303_75@mail.ru.

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

Kirill S. Ivannikov, Director of the Research and Production Complex “Special Software”, JSC Research and Production Enterprise “Radar mms”, St. Petersburg, Russia; ivannikov_ks@radar-mms.com.

Sergey I. Moiseev, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; mail@moiseevs.ru.

Статья поступила в редакцию 15.09.2022

The article was submitted 15.09.2022

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ В ГОЛОВОЛОМКЕ HUMAN RESOURCE MACHINE ПО ЧИСЛУ КОМАНД И ОПЕРАЦИЙ

А.В. Копотева¹, *kopoteva_av@mail.ru*

Е.А. Кабиольский², *evgkab@susu.ru*

¹ *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия*

² *Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия*

Аннотация. Видеоигры являются одним из распространенных видов современного досуга, а также относятся к синтетическому искусству коллективного авторства. Достаточно много написано о вреде компьютерных игр, однако есть и исследования, свидетельствующие о пользе некоторых их видов, в том числе различных головоломок. Часть из них являются весьма специфическими продуктами, в частности, различные симуляторы программирования. **Цель исследования.** Данная работа посвящена оптимизации наиболее сложных алгоритмов в видеоигре Human Resource Machine в соответствии с принятыми в ней критериями оптимальности. Предполагается, что решение каждой задачи должно содержать не более заданного числа команд и выполняться не более чем за определенное количество шагов. Для большей части задач может быть найдено решение, одновременно удовлетворяющее обоим критериям, однако некоторые головоломки требуют реализации двух отдельных алгоритмов. Всего в игре 36 задач различного типа и уровня сложности, из них выбрано 6 доставивших автору наибольшие трудности при прохождении. **Материалы и методы.** В работе описываются идеи и алгоритмы решения задач на естественном языке, удовлетворяющие заданным ограничениям, а также приводятся результирующие значения количества команд в коде и операций в процессе его исполнения. Точные решения не приводятся, поскольку в силу громоздкости игрового языка соответствующие алгоритмы с комментариями оказались слишком объемны для статьи. Кроме того, данная статья призвана лишь констатировать возможность нахождения собственных оптимальных решений рассматриваемых головоломок. **Результаты.** Для двух задач из шести рассмотренных в работе удалось получить алгоритмы, удовлетворяющие ограничениям и по числу команд, и по количеству операций. Для оставшихся четырех задач разработано по паре алгоритмов, каждый из которых удовлетворяет одному из ограничений. **Заключение.** По результатам проделанной работы можно утверждать, что существуют компьютерные игры, которые являются не просто развлечением, а могут представлять собой весьма непростой интеллектуальный вызов. Нахождение оптимальных решений в головоломках Human Resource Machine оказалось весьма непростым и интересным занятием, позволившим избавиться от шаблонов и иначе взглянуть на некоторые классические задачи программирования.

Ключевые слова: видеоигра, головоломка, программирование, сортировка, оптимизация алгоритма

Для цитирования: Копотева А.В., Кабиольский Е.В. Оптимизация алгоритмов в головоломке Human Resource Machine по числу команд и операций // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 16–26. DOI: 10.14529/ctcr220402

Original article

DOI: 10.14529/ctcr220402

COMMANDS AMOUNT AND EXECUTION STEPS OPTIMIZATION IN HUMAN RESOURCE MACHINE PUZZLES SOLUTION ALGORITHMS

A.V. Kopoteva¹, kopoteva_av@mail.ruE.A. Kabiolskiy², evgkab@susu.ru¹ Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Videogames are one of the most common forms of modern leisure, and also can be viewed as a form of collective authorship synthetic art. We often hear about computer games health hazard, but there are also studies indicating the benefits of some of their types, including various puzzles. Some puzzle videogames are very specific products, in particular, various programming simulators. **Aim.** In this work we consider the most complex algorithms optimization in the video game Human Resource Machine according to in-game optimality criteria. It is assumed that each task solution should contain no more than a given number of commands and be executed in no more than a certain number of steps. For most problems, a solution that simultaneously satisfies both criteria can be found, but some puzzles require two separate algorithms development. There are 36 tasks of various types and difficulty in the game, we selected 6 of them that proved to be the most difficult for optimization. **Materials and methods.** The issue describes chosen problems solving ideas and algorithms in natural language that satisfy both in-game optimality criteria, and also provides the resulting values of code commands number and amount of execution operations. Exact solutions are not included in the issue, because due to the game language cumbersome nature the corresponding algorithms with comments are too ponderous for the article. In addition, this article's purpose is only to state the possibility and basic ideas of optimal solutions to the puzzles under consideration and not describing solutions themselves. **Results.** For two of the six tasks considered in the issue, we managed to obtain algorithms that satisfy the limitations both in the numbers of commands and operations. For the remaining four tasks, a couple of algorithms have been developed, one for each constraint. **Conclusion.** Based on the results of this issue we can confirm that there are computer games that are not just for entertainment, sometimes they can offer a real intellectual challenge. Finding optimal puzzles solutions in Human Resource Machine turned out to be a difficult and interesting task, which allowed us to break patterns and take a different look at some classical programming problems.

Keywords: videogame, puzzle, programming, sorting, algorithm optimization

For citation: Kopoteva A.V., Kabiolskiy E.A. Commands amount and execution steps optimization in Human Resource Machine puzzles solution algorithms. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(4):16–26. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220402

Введение

Одной из распространенных и стремительно развивающихся сфер индустрии развлечений в настоящее время являются компьютерные и консольные видеоигры. Количество платформ и жанров на рынке весьма велико, а качество и содержание видеоигр существенно варьируют. Несмотря на более чем полувековую историю существования видеоигр как феномена и продукта, исследования, посвященные их месту в современной культуре и влиянию на человека, его физическое здоровье, способности и психику, активно ведутся и в настоящее время. Наличие сюжетной, графической и музыкальной составляющих, а также авторства (хоть и зачастую коллективного) позволяет считать видеоигры видом массовой культуры, обладающим элементами современного синтетического искусства [1, 2]. Помимо отрицательных последствий увлечения видеоиграми (ухудшение зрения, проблемы с опорно-двигательным аппаратом, зависимость) исследователи выделяют и положительные их виды [3]. К ним относят, в частности, повышение способности к концентрации, увеличение скорости реакции, развитие памяти, логики, способности решать нестандартные задачи, возможность обучения вообще и изучения иностранных языков в частности. Например, в [4] устанавливается положительное влияние игры в тетрис на мозговую и

сердечную деятельность, а в [5] обсуждается положительное влияние компьютерных игр на людей, вынужденных находиться в изоляции в период пандемии COVID-19. В [6] подтверждается возможность улучшения навыков алгоритмизации у учащихся с помощью видеоигры с элементами программирования. Авторы [7] устанавливают комплексное улучшение когнитивных функций лиц, 20 часов игравших в головоломки, основанные на физике. С нашей точки зрения видеоигра как любая иная форма досуга может быть просто деятельностью с целью отдыха или способом саморазвития и самореализации. Если мы говорим об игре как о способе отдыха, то это могут быть игры совершенно разных жанров с интересным сюжетом, оригинальной идеей, необычной реализацией или стилизацией, как минимум приятной графикой и музыкальным сопровождением. Если же мы говорим об игре как способе саморазвития, то это, во-первых, обучающие игры, которые в настоящее время активно вовлекаются в образовательный процесс [8, 9], а во-вторых, головоломки. Исследования, посвященные головоломкам и их решению, ведутся достаточно активно, причем часть изучаемых игр существует как самостоятельная форма досуга (например, sudoku [10], кроссворды [11], лабиринты [12]), другие же возникли и получили распространение именно в формате видеоигры (например, сокобан [13, 14] и сапер [15]). Еще одна группа видеоигр-головоломок посвящена решению различных задач программирования. Игровые продукты такого рода являются нишевыми, разрабатываются небольшими студиями или даже единственным автором, имеют индивидуальный визуальный стиль, реализуют собственный язык программирования и предлагают игроку набор задач увеличивающейся по мере прохождения сложности, которые могут быть решены различными способами. При этом нам не удалось найти исследования, посвященные разработке алгоритмов решения таких задач, обнаружилось лишь обсуждение в игровом сообществе Steam и прохождения в Интернет. Данная работа призвана восполнить этот пробел, поскольку некоторые задачи в таких играх весьма нетривиальны и заслуживают внимания.

Описание головоломки Human Resource Machine

Прекрасным примером игры-головоломок для программистов является Human Resource Machine от звездной студии Tomorrow Corporation, авторов World of Goo и Little Inferno. Это студия, которая создает маленькие шедевры, обладающие любопытным сюжетом, оригинальной идеей, нешаблонными игровыми механиками, самобытной графикой, отличным музыкальным и звуковым сопровождением. Ну и в случае Human Resource Machine и ее продолжения 7 Billion Human – это еще и разнообразные задачи-головоломок на программирование. Причем самое интересное заключается в том, что задачи можно не просто решить, а решить в соответствии с двумя различными критериями оптимальности. И если нахождение произвольного решения вполне достижимо, то оптимизация в части задач, собственно, и является головоломкой и представляет собой весьма нетривиальный процесс. Всего в игре 36 задач возрастающей сложности, предполагающих разработку алгоритма преобразования набора входных данных в выходные в соответствии с определенными требованиями. 25 задач образуют сюжетную линию игры, а 11 являются необязательными для прохождения (бонусными) в силу своей повышенной сложности. Естественно, чем больше номер задачи, тем выше ее сложность в теоретическом и прикладном плане. С точки зрения программирования все задачи достаточно простые и нахождение их решения человеку, обладающему некоторыми навыками программирования, не представляет существенной сложности. Наиболее нетривиальным моментом игры является оптимизация соответствующих алгоритмов («испытания оптимизации»): каждая задача может быть решена с ограничениями на количество команд в коде и на число операций в процессе выполнения кода. Для части задач удастся найти решения, удовлетворяющие обоим ограничениям, для других приходится разрабатывать алгоритмы, удовлетворяющие каждому ограничению в отдельности. В данной статье рассмотрены лишь те задачи, оптимизация которых потребовала существенных умственных усилий. Все решения, о которых далее пойдет речь, найдены автором самостоятельно, хотя информацию об алгоритмах решения некоторых задач и особенностях их реализации внутриигровыми средствами пришлось искать в Интернете. Совокупное время, проведенное автором в игре, – около 45 часов. Естественно, наибольшим интеллектуальным вызовом стали некоторые бонусные и последний сюжетный уровень, о них и пойдет речь далее. Заметим, что внутриигровой язык программирования достаточно громоздок, а наличие готового решения потенциально лишает чита-

теля удовольствия нахождения собственного, поэтому мы будем излагать лишь идею и алгоритм решения и приводить результаты работы соответствующего алгоритма.

Рассмотрим решения 6 наиболее сложных с точки зрения оптимизации уровней Human Resource Machine. Это 5 бонусных задач («Числа Фибоначчи», «Сортировка трех», «Упорядочиватель», «Подрыв чисел» и «Фабрика простоты») и последняя сюжетная задача «Этаж сортировки».

1. Числа Фибоначчи: для каждого значения на входе вывести последовательность чисел Фибоначчи, его не превышающих. Испытание объема: использовать не более 19 команд, испытание скорости: выполнить не более чем за 156 операций.

Авторское решение: два алгоритма, 18/172 и 28/96.

Идея решения, удовлетворяющего испытанию объема, заключается в том, что последовательность чисел начинается не с двух единиц, а с единицы и нуля (табл. 1). Каждое следующее значение получается как сумма двух предыдущих. Будем выводить значение в первой строке, если оно меньше полученного на входе числа. Алгоритм удастся реализовать, используя 18 команд, однако при этом число операций превышает требуемые 156 за счет необходимости расчета текущего элемента $i + 1$ -го шага с перезаписью текущего элемента i -го шага в ячейку предыдущего элемента $i + 1$ -го шага.

Таблица 1

Идея алгоритма вывода чисел Фибоначчи с 18 командами

Table 1

18 commands Fibonacci number output algorithm idea

Вход	19							
Номер шага	1	2	3	4	5	6	7	8
Текущий элемент	1	1	2	3	5	8	13	21
Вывод текущего элемента	+	+	+	+	+	+	+	-
Предыдущий элемент	0	1	1	2	3	5	8	13

Идея решения, удовлетворяющего испытанию скорости, заключается в том, чтобы сразу вывести обе первые единицы, а последующие значения выводить, чередуя элементы (табл. 2). При этом увеличивается количество команд кода, так как приходится считывать и выводить значения из разных ячеек, однако уменьшается число операций за счет того, что не нужно постоянно записывать текущий элемент последовательности в ячейку, из которой происходит вывод.

Таблица 2

Идея алгоритма вывода чисел Фибоначчи с 96 операциями

Table 2

96 steps Fibonacci number output algorithm idea

№ шага	Элемент 1	Элемент 2	Вход
0	1 (выход)	1 (выход)	19
1	2 (выход)	1	
2	2	3 (выход)	
3	5 (выход)	3	
4	5	8 (выход)	
5	13 (выход)	8	
6	13	21 > 19	

2. Сортировка трех: для каждого трех входных значений вывести их в порядке возрастания. Испытание объема: использовать не более 34 команд, испытание скорости: выполнить не более чем за 78 операций.

Авторское решение: два алгоритма, 34/126 и 63/74.

По нашему мнению, это задача с самыми сложными заданиями оптимизации в игре. Причем не потому, что их действительно сложно реализовать, а потому что сами оптимальные методы решения несколько искусственны, поэтому до них сложно додуматься без подсказки. Кроме того,

анализ контента центра сообщества Steam показал, что алгоритма, удовлетворяющего обоим заданиям оптимизации, пока не найдено.

Итак, рассматриваемая задача является частным случаем задачи сортировки. Три различных числа дают 6 возможных порядков расположения, для их упорядочения в наихудшем случае необходимо три сравнения (табл. 3).

Количества сравнения для сортировки трех элементов

Таблица 3

Comparison quantities for sorting three elements

Table 3

№	Порядок расположения	Сравнения для упорядочения
1	1 2 3	Два сравнения: – второй меньше третьего; – первый меньше второго (а значит, и третьего, последовательность упорядочена)
2	1 3 2	Два сравнения: – второй больше третьего – меняем их местами (получаем 1 2 3); – первый меньше второго (а значит, и третьего, последовательность упорядочена)
3	2 1 3	Три сравнения; – второй меньше третьего; – первый больше второго; – первый меньше третьего, значит, меняем местами 1 и 2 местами (получаем 1 2 3, последовательность упорядочена)
4	2 3 1	Три сравнения: – второй больше третьего – меняем их местами (получаем 2 1 3); – первый больше второго; – первый меньше третьего, значит, меняем местами 1 и 2 местами (получаем 1 2 3, последовательность упорядочена)
5	3 1 2	Три сравнения: – второй меньше третьего; – первый больше второго; – первый больше третьего, значит, меняем 1 и 2 местами (получаем 1 3 2), меняем 2 и 3 местами, получаем 1 2 3, последовательность упорядочена)
6	3 2 1	Три сравнения: – второй больше третьего – меняем их местами (получаем 3 1 2); – первый больше второго; – первый больше третьего, значит, меняем 1 и 2 местами (получаем 1 3 2), меняем 2 и 3 местами, получаем 1 2 3, последовательность упорядочена)

Естественная идея решения следующая. Считываем все три входных значения. На первом шаге сравниваем второе и третье значения, если второе больше, то меняем их местами. На втором шаге сравниваем первое и третье значения, если первое больше третьего, то меняем их местами. И на третьем шаге сравниваем первое и второе значения, если первое больше второго, то меняем их местами. В результате получаем упорядоченную последовательность, которую необходимо отправить на выход. Соответствующее авторское решение содержит 36 команд и выполняется за 120 операций, т. е. не удовлетворяет ни одному из испытаний оптимизации.

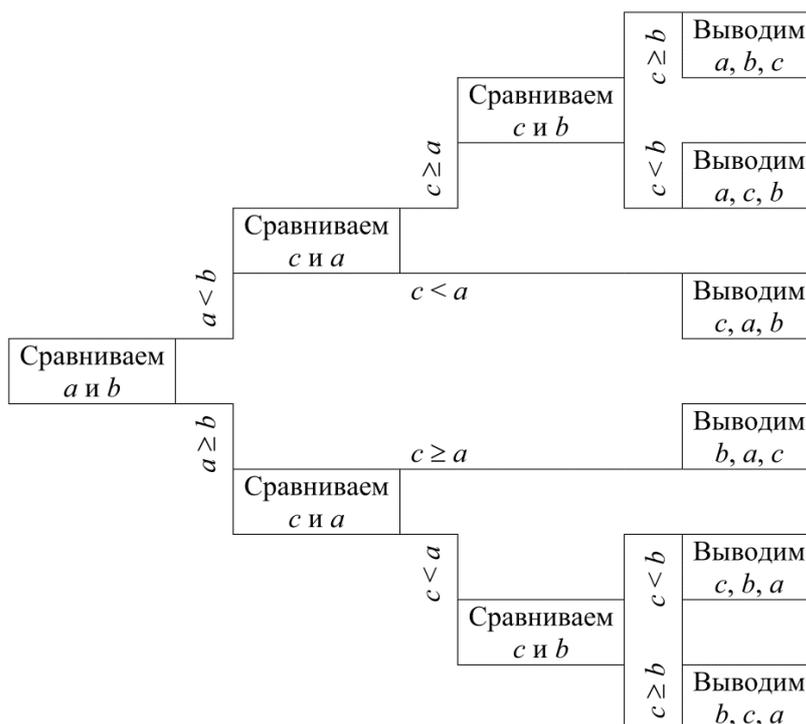
Модификация алгоритма для испытания объема разработана автором, исходя из следующих соображений. Поскольку для сортировки трех значений сравнений должно быть два или три, но при этом число команд превышает допустимый предел, необходимо выполнить два раза по два сравнения. Алгоритм приобретает следующий вид.

1. Считываем и сохраняем все три сортируемых значения.
2. Сравниваем второе и третье значение, если третье меньше второго, меняем их местами.

- 3. Сравниваем первое и второе значения:
 - если второе меньше первого, меняем их местами и переходим к пункту 2;
 - если первое меньше второго, то последовательность упорядочена, переходим к пункту 4.
- 4. Выводим упорядоченную последовательность.

Данный алгоритм удастся реализовать, используя 34 команды, однако необходимость выполнить четыре сравнения вместо трех приводит к увеличению числа операций со 120 до 126.

Алгоритм, обеспечивающий сортировку за заданное число операций, представляет собой анализ вариантов в табл. 3 и организацию вывода соответствующим образом. Лучшей его иллюстрацией является дерево решений (см. рисунок). Естественно, результирующий код получается громоздким (63 команды), а команда вывода фигурирует в нем 18 раз. Тем не менее решение на его основе позволяет отсортировать набор входных последовательностей за 74 операции при требуемых по заданию 78.



Анализ значений и организация вывода в задаче «Сортировка трех» “Sorting three” problem values analysis and output organization

3. Упорядочиватель: для двух данных слов вывести первое в алфавитном порядке. Испытание объема: использовать не более 39 команд, испытание скорости: выполнить не более чем за 109 операций.

Авторское решение: один алгоритм, 36/108. В данной задаче имеет смысл охарактеризовать особенности входных данных, так как именно они определяют специфику решения. Алгоритм должен обработать одну пару английских слов, т. е. нет необходимости организовывать цикл для ввода данных. Слова могут быть как разной, так и одинаковой длины. Для обозначения окончания слова используется ноль.

Идея решения заключается в считывании обоих слов, организации счетчиков адресов букв для каждого из них и последовательного вычитания из текущей буквы первого слова соответствующей буквы второго слова. Пока разность букв нулевая, т. е. они совпадают, счетчики увеличиваются на 1. Как только получилась положительная (отрицательная) разность, выводим второе (первое) слово. Если при считывании буквы получили ноль, выводим короткое слово.

Алгоритм решения задачи следующий.

1. Считываем первое слово, записываем его последовательно в ячейки памяти, начиная с нулевой. Ноль определяет конец первого слова, увеличенный на 1 адрес соответствующей ячейки определяет начало второго слова.

2. Записываем второе слово в ячейки памяти, начиная с запомненного на предыдущем шаге адреса.

3. Запоминаем адреса начальных букв обоих слов.

4. Считываем текущий знак первого слова:

– если это ноль, то первое слово короче второго, отправляем его на выход, адрес первой буквы нулевой;

– если это не ноль, переходим к шагу 5.

5. Считываем текущий знак второго слова.

– если это ноль, то второе слово короче первого, отправляем его на выход, адрес первой буквы известен;

– если это не ноль, переходим к шагу 6.

6. Сравниваем буквы первого и второго слова (вычитаем из буквы первого слова второе, получаем разницу их позиций в латинском алфавите):

– если результат нулевой, то буквы одинаковые, увеличиваем на 1 адреса букв обоих слов и переходим к шагу 4;

– если результат положительный, то буква первого слова имеет больший номер, чем буква второго слова, т. е. по алфавиту первым будет второе слово, отправляем его на выход, адрес первой буквы известен;

– если результат отрицательный, то буква первого слова имеет меньший номер, чем буква второго слова, т. е. по алфавиту первым будет первое слово, отправляем его на выход, адрес первой буквы нулевой.

4. Подрыв чисел: каждое число на входе разбейте на отдельные цифры и выведите их. Испытание объема: использовать не более 30 команд, испытание скорости: выполнить не более чем за 165 операций.

Авторское решение: два алгоритма, 30/218 и 51/159.

На вход подаются трехзначные и двузначные числа, а также цифры. В двух ячейках памяти хранятся числа 10 и 100.

Формально алгоритм решения задачи весьма незамысловат.

1. Формируем нулевые счетчики количества сотен и десятков.

2. Последовательно уменьшаем входное значение на 100 и увеличиваем на единицу соответствующий счетчик до достижения двузначного числа. Если первое же вычитание дает отрицательный результат, то число двузначное, переходим к пункту 4.

3. Выводим счетчик сотен, если он отличен от нуля.

4. Последовательно уменьшаем двузначное значение на 10 и увеличиваем на единицу соответствующий счетчик до достижения однозначного числа.

5. Выводим счетчик десятков, если он не нулевой или если число было трехзначным.

6. Выводим оставшуюся цифру.

Данная задача является предпоследней задачей повышенной сложности в игре, и реализовать алгоритмы, удовлетворяющие ограничениям на число команд и операций, оказалось весьма непросто. Дополнительную сложность представляет необходимость определить, следует ли выводить нулевой счетчик десятков на шаге 5. В случае алгоритма, удовлетворяющего испытанию объема, данная проверка реализуется следующим образом: нулевой счетчик десятков выводится, если разность нулевого счетчика десятков и счетчика сотен отрицательная (т. е. счетчик сотен положительный).

Алгоритм, удовлетворяющий испытанию скорости, несколько сложнее. Он предполагает определение порядка числа: трехзначные, двузначные и однозначные. Однозначные числа не записываются в память, для них не формируются счетчики десятков и сотен. Для двузначных чисел формируется только счетчик десятков. Однако уменьшения числа операций за счет экономии на счетчиках оказалось недостаточно, поэтому приходится выполнять вычитание из текущего значения двух сотен/десятков за один цикл и после каждого вычитания проверять положительность результата. При этом существенно возрастает не только число команд алгоритма (до 51), но и скорость его работы; результирующий алгоритм выполняется за 159 операций при требуемых 165.

5. Фабрика простоты: для каждого числа на входе выведите его простые множители в порядке возрастания. Испытание объема: использовать не более 28 команд, испытание скорости: выполнить не более чем за 399 операций.

Авторское решение: два алгоритма, 24/452 и 46/360.

Алгоритм, соответствующий испытанию объема, имеет следующий вид.

1. Считываем входное значение, записываем его в память.
2. Проверяем, не равно ли текущее значение в памяти единице:
 - если текущее значение равно единице, считываем следующее входное значение;
 - если текущее значение больше единицы, переходим к шагу 3 алгоритма.
3. Формируем наименьший возможный множитель числа – двойку, записываем его в память.
4. Последовательно вычитаем из числа в памяти текущий множитель до достижения нуля или отрицательного результата:
 - если результат отрицательный, данное число на данный множитель нацело не делится, увеличиваем множитель на 1 и переходим в начало шага 4;
 - если результат нулевой, то число делится на множитель нацело, переходим к шагу 5.
5. Выводим текущий множитель.
6. Находим результат от деления данного числа на данный множитель:
 - формируем счетчик;
 - последовательно вычитаем текущий множитель из текущего числа и увеличиваем счетчик до достижения нулевого результата;
 - полученное значение счетчика определяет результат деления;
 - заменяем текущее число в памяти на значение счетчика;
 - переходим к шагу 3 алгоритма.

Анализ входных значений позволил установить, что они не превосходят двадцати. Тогда идея алгоритма, соответствующего испытанию скорости, состоит в установлении, является ли данное значение из списка простых чисел от двух до девятнадцати делителем поданного на вход числа.

Алгоритм, соответствующий испытанию скорости, имеет следующий вид.

1. Формируем список простых чисел от двух до 19, записываем их в ячейки с адресами, начиная с нуля и возрастающими на единицу.
2. Считываем входное значение, записываем его в память.
3. Устанавливаем адрес текущего простого множителя нулевым (двойка).
4. Проверяем, не равно ли текущее значение в памяти единице:
 - если текущее значение равно единице, считываем следующее входное значение;
 - если текущее значение больше единицы, переходим к шагу 5 алгоритма.
5. Устанавливаем счетчик, показывающий целую часть от деления данного числа на данный простой множитель.
6. Последовательно вычитаем из числа в памяти текущий множитель до достижения нуля или отрицательного результата, увеличивая счетчик целой части:
 - если результат отрицательный, данное число на данный множитель нацело не делится, увеличиваем адрес множителя на 1 и переходим к шагу 5;
 - если результат нулевой, то число делится на множитель нацело, переходим к шагу 7.
7. Выводим текущий множитель.
8. Записываем значение счетчика на место числа, для которого ищутся простые множители.
9. Переходим к шагу 4 алгоритма.

6. Этаж сортировки: отсортируйте каждую входную последовательность в порядке возрастания и выведите результат. Испытание объема: использовать не более 34 команд, испытание скорости: выполнить не более чем за 714 операций.

Авторское решение: один алгоритм, 33/706.

Идея решения состоит в разбиении сортируемого массива на головную и хвостовую части, причем головная часть является уже отсортированной; в хвостовой части ищется минимальный элемент, меняется местами с первым элементом хвостовой части, после чего головная часть удлиняется, а хвостовая укорачивается на этот элемент. Специфика алгоритма, удовлетворяющего

обоим испытаниям, заключается в сортировке массива в порядке убывания и выводе его элементов, начиная с «хвоста». Он имеет следующий вид.

1. Считываем массив, подлежащий сортировке, в качестве индексов заменяемого, минимального и текущего элементов определяем индекс последнего элемента массива, запоминаем его.
2. Уменьшаем индекс текущего элемента на 1, сравниваем результат с нулем:
 - если результат отрицательный, достигнут последний элемент массива, переходим к шагу 4;
 - иначе переходим к шагу 3.
3. Сравниваем значение текущего и минимального элементов:
 - если текущее значение меньше минимального, переопределяем индекс минимального элемента на текущий и переходим к шагу 2;
 - иначе переходим к шагу 2.
4. Меняем местами заменяемый и минимальный элементы, выводим найденный минимальный элемент.
5. Уменьшаем счетчик заменяемого, минимального и текущего элементов на 1, переходим к шагу 2 алгоритма.

Заключение

В статье рассмотрены авторские оптимизированные алгоритмы шести наиболее сложных задач игры-головоломки Human Resource Machine. Оптимизация в соответствии с правилами игры выполнялась по количеству команд кода и операций, производимых в процессе его выполнения. Часть оптимальных решений удовлетворяет обоим требованиям, т. е. обеспечивает заданное число операций при заданном количестве команд, остальные потребовали разработки двух различных алгоритмов. Отметим, что в игровом сообществе Steam можно найти и другие варианты решения тех же задач, возможно, с еще меньшим количеством команд/операций, однако автор придерживается мнения, что собственное решение головоломки приносит гораздо больше удовлетворения, чем чужое. Кроме того, установлено, что даже для самых сложных задач в игре реально отыскать оптимальные решения, не прибегая к копированию чужого кода. Таким образом, даже простые задачи по программированию могут иметь сложные решения, требующие нестандартных подходов и инновационных идей, что не только приносит массу интеллектуального удовольствия и удовлетворения от полученных работающих решений, но и позволяет использовать их, например, в качестве олимпиадных заданий.

Список литературы

1. Месеняшина Л.А., Селютин А.А. Компьютерная игра: аттракцион? Искусство? // Знак: проблемное поле медиаобразования. 2011. № 1 (7). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompyuternaya-igra-attraktsion-iskusstvo> (дата обращения: 23.08.2022).
2. Шереметьева М.А. Статус компьютерных игр в современной культуре // Ярославский педагогический вестник. 2019. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/status-kompyuternyh-igr-v-sovremennoy-kulture> (дата обращения: 23.08.2022).
3. Sălceanu C. The Influence of Computer Games on Children's Development. Exploratory Study on the Attitudes of Parents // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2014. Vol. 149. P. 837–841. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.08.323. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042814050368> (дата обращения: 23.08.2022).
4. P82 Assessment of Correlation Between EEG Frequency Subbands and HRV in Playing Puzzle Video Game / S. Gündoğdu, Ö.H. Çolak, E. Apaydın Doğan, E. Gülbetekin, Ö. Polat // Clinical Neurophysiology. 2020. Vol. 131, iss. 4. P. e217-e218. DOI: 10.1016/j.clinph.2019.12.080. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1388245719314464> (дата обращения: 23.08.2022).
5. Kim M. Does playing a video game really result in improvements in psychological well-being in the era of COVID-19? // Journal of Retailing and Consumer Services. 2021. Vol. 61. DOI: 10.1016/j.jretconser.2021.102577. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969698921001430> (дата обращения: 23.08.2022).
6. Zhao W., Shute V.J. Can playing a video game foster computational thinking skills? // Computers & Education. 2019. Vol. 141. DOI: 10.1016/j.compedu.2019.103633. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360131519301861> (дата обращения: 23.08.2022).

7. Oei A.C., Patterson M.D. Playing a puzzle video game with changing requirements improves executive functions // *Computers in Human Behavior*. 2014. Vol. 37. P. 216–228. DOI: 10.1016/j.chb.2014.04.046. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0747563214002672?via%3Dihub> (дата обращения: 23.08.2022).
8. Шмелев Б.А. Лингводидактический потенциал обучающих компьютерных игр // *Вестник ТГУ*. 2021. № 192. DOI: 10.20310/1810-0201-2021-26-192-58-69. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/lingvodidakticheskiy-potentsial-obuchayuschih-kompyuternyh-igr> (дата обращения: 20.08.2022).
9. How instructional context can impact learning with educational technology: Lessons from a study with a digital learning game / B.M. McLaren, J.E. Richey, H. Nguyen, X. Hou // *Computers & Education*. 2022. Vol. 178. DOI: 10.1016/j.compedu.2021.104366. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360131521002438> (дата обращения: 23.08.2022).
10. Maji A.K., Jana S., Pal R.K. An Algorithm for Generating only Desired Permutations for Solving Sudoku Puzzle // *Procedia Technology*. 2013. Vol. 10. P. 392–399. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.375. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313005379> (дата обращения: 23.08.2022).
11. Anu Th., Sangeetha S. Towards a Semantic Approach for Candidate Answer Generation in Solving Crossword Puzzles // *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 171. P. 2310–2315. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.375. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050920312424> (дата обращения: 23.08.2022).
12. Jiang M., Tejada P.J., Wang H. Quell // *Theoretical Computer Science*. 2015. Vol. 593. P. 70–78. DOI: 10.1016/j.tcs.2015.05.044. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304397515004983> (дата обращения: 23.08.2022).
13. Васильев А.П., Абрамов А.Х. Искусственный интеллект на основе нейронных сетей // *Academy*. 2018. № 5 (32). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-na-osnove-neyronnyh-setey> (дата обращения: 20.08.2022).
14. Crippa M., Lanzi P.L., Marocchi F. An analysis of Single-Player Monte Carlo Tree Search performance in Sokoban // *Expert Systems with Applications*. 2022. Vol. 192. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.116224. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417421015372?via%3Dihub> (дата обращения: 23.08.2022).
15. A solver of single-agent stochastic puzzle: A case study with Minesweeper / Ch. Liu, Sh. Huang, G. Naying et al. // *Knowledge-Based Systems*. 2022. Vol. 246. DOI: 10.1016/j.knosys.2022.108630. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705122002842> (дата обращения: 23.08.2022).

References

1. Mesenyashina L.A., Selyutin A.A. Computer Game: Attraction? Art? *Znak: problemnoe pole mediaobrazovaniya*. 2011;(1). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompyuternaya-igra-atraktsion-iskusstvo> (accessed 23.08.2022). (In Russ.)
2. Sheremet'yeva M.A. [Status of Computer Games in Contemporary Culture]. *Yaroslavl Pedagogical Bulletin*. 2019;(6). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/status-kompyuternyh-igr-v-sovremennoy-kulture> (accessed 23.08.2022). (In Russ.)
3. Sălceanu C. The Influence of Computer Games on Children's Development. Exploratory Study on the Attitudes of Parents. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2014;149:837–841. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.08.323. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042814050368> (accessed 23.08.2022).
4. Gündoğdu S., Çolak Ö.H., Apaydin Doğan E., Gülbetekin E., Polat Ö. P82 Assessment of Correlation Between EEG Frequency Subbands and HRV in Playing Puzzle Video Game. *Clinical Neurophysiology*. 2020; 131(4):217–218. DOI: 10.1016/j.clinph.2019.12.080. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1388245719314464> (accessed 23.08.2022).
5. Kim M. Does Playing a Video Game Really Result in Improvements in Psychological Well-Being in the Era of COVID-19? *Journal of Retailing and Consumer Services*. 2021;61. DOI: 10.1016/j.jretconser.2021.102577. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969698921001430> (accessed 23.08.2022).
6. Zhao W., Shute V.J. Can playing a video game foster computational thinking skills? *Computers & Education*. 2019;141. DOI: 10.1016/j.compedu.2019.103633. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360131519301861?via%3Dihub> (accessed 23.08.2022).

7. Oei A.C., Patterson M.D. Playing a puzzle video game with changing requirements improves executive functions. *Computers in Human Behavior*. 2014;37:216–228. DOI: 10.1016/j.chb.2014.04.046. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0747563214002672?via%3Dihub> (accessed 23.08.2022).
8. Shmelev B.A. Linguodidactic Potential of Educational Computer Games. *Tambov University Review: Series Humanities*. 2021;192. (In Russ.) DOI: 10.20310/1810-0201-2021-26-192-58-69. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/lingvodidakticheskiy-potentsial-obuchayuschih-kompyuternyh-igr> (accessed 20.08.2022).
9. McLaren B.M., Richey J.E., Nguyen H., Hou X. How instructional context can impact learning with educational technology: Lessons from a study with a digital learning game. *Computers & Education*. 2022;178. DOI: 10.1016/j.compedu.2021.104366. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360131521002438> (accessed 23.08.2022).
10. Maji A.K., Jana S., Pal R.K. An Algorithm for Generating only Desired Permutations for Solving Sudoku Puzzle. *Procedia Technology*. 2013; 10:392–399. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.375. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313005379> (accessed 23.08.2022).
11. Anu Th., Sangeetha S. Towards a Semantic Approach for Candidate Answer Generation in Solving Crossword Puzzles. *Procedia Computer Science*. 2020;171:2310–2315. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.375. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050920312424> (accessed 23.08.2022).
12. Jiang M., Tejada P.J., Wang H. Quell. *Theoretical Computer Science*. 2015;593:70–78. DOI: 10.1016/j.tcs.2015.05.044. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304397515004983> (accessed 23.08.2022).
13. Vasil'yev A.P., Abramov A.H. [Artificial Intelligence Based on Neural Networks]. *Academy*. 2018;5(32). (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-na-osnove-neyronnyh-setey> (accessed 20.08.2022).
14. Crippa M., Lanzi P.L., Marocchi F. An analysis of Single-Player Monte Carlo Tree Search performance in Sokoban. *Expert Systems with Applications*. 2022;192. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.116224. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417421015372?via%3Dihub> (accessed 23.08.2022).
15. Liu Ch., Huang Sh., Naying G., Khalid M.N.A., Iida H. A solver of single-agent stochastic puzzle: A case study with Minesweeper. *Knowledge-Based Systems*. 2022;246. DOI: 10.1016/j.knosys.2022.108630. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705122002842> (accessed 23.08.2022).

Информация об авторах

Копотева Анна Владимировна, канд. техн. наук, доц. кафедры общенаучных дисциплин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; kopoteva_av@mail.ru.

Кабюльский Евгений Алексеевич, аспирант кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, начальник управления информатизации, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; evgkab@susu.ru.

Information about the authors

Anna V. Kopoteva, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of General Scientific Disciplines, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; kopoteva_av@mail.ru.

Evgeny A. Kabiolsky, Postgraduate Student of the Department of Information and Analytical Support of Management in Social and Economic Systems, Head of Informatization Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; evgkab@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 20.09.2022

The article was submitted 20.09.2022

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ АВТОМАТОВ С БЛОКИРОВКОЙ ОБСЛУЖИВАНИЯ

В.Е. Белоусов, belousov@vgasu.vrn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0934-6724>

Д.В. Дорофеев, upr_stroy_kaf@vgasu.vrn.ru

Л.А. Можарова, upr_stroy_kaf@vgasu.vrn.ru

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. В данной работе формулируется задача применения вероятностных автоматов с блокировкой для исследования сложных гибридных информационных систем. Действительно, в большинстве задач приходится иметь дело с влиянием различных случайных факторов, к которым можно отнести ненадежные элементы электронного оборудования, периодически выходящие из строя, случайные реакции лиц, принимающих решения, вероятностные колебания длительности выполнения различных этапов работ, составляющих исследуемый процесс. **Цель исследования** заключается в необходимости повышения эффективности управления автоматизированными информационными системами на основе моделей имитационного обслуживания с блокировкой. **Материалы и методы.** Рассмотрим основные принципы, положенные в основу метода вероятностно-автоматного моделирования. Метод базируется на теории автоматов, заключающейся в использовании результатов машинного эксперимента при создании сложных самоорганизующихся информационных систем, а также в системах автоматизации производственных процессов. Вероятностно-автоматная модель информационной системы представляет собой не что иное как агрегативную модель при раздроблении системы на самые мелкие одномерные агрегаты. Основными понятиями автоматного моделирования являются вероятностный автомат и система вероятностных автоматов. **Результаты.** В результате исследования получены таблицы условных функциональных переходов и на ее основе проанализированы автоматы с блокировкой обслуживания. Доказана их эффективность для автоматизированной информационной системы сложной структуры. **Заключение.** Работа системы заключается в выборе совокупности регулируемых параметров или совокупности испытываемых вариантов. Для этого принимают решение, по какому показателю целесообразно судить об эффективности работы информационной системы. После этого решается вопрос о том, за счет какого изменения режима работы системы, ее структуры или значений параметров можно добиться максимальной эффективности. Речь идет о выборе совокупности регулируемых параметров или совокупности испытываемых вариантов. Показатель эффективности работы системы является детерминированной функцией регулируемых параметров. Эта функция называется целевой или критерием эффективности системы. Далее, из заданного множества значений совокупности регулируемых параметров выбрать такую совокупность этих значений, при которой целевая функция принимает минимальное (максимальное) значение.

Ключевые слова: автомат, агрегаты, знания, модели, имитация, система, состояние, параметры, управление

Для цитирования: Белоусов В.Е., Дорофеев Д.В., Можарова Л.А. Моделирование автоматизированных информационных систем на основе вероятностных автоматов с блокировкой обслуживания // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 27–37. DOI: 10.14529/ctcr220403

APPLICATION OF METHODS OF INFORMATION ENGINEERING FOR CHANGE OF STRUCTURE OF MULTILAYER SYSTEMS OF ORGANIZATIONAL MANAGEMENT

V.E. Belousov, belousov@vgasu.vrn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0934-6724>

D.V. Dorofeev, upr_stroy_kaf@vgasu.vrn.ru

L.A. Mozharova, upr_stroy_kaf@vgasu.vrn.ru

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. In this work the task is formulated and the method of reconfiguration of systems of organizational management on the basis of synthesis of the functional structure having an impact on an appearance of all system considerably defining an order of its functioning, integrating in a whole of means of technical and mathematical, program and information support is offered. **The research objective** consists in need of increase in effective management of organizational systems on the basis of complex development, implementation and application of funds of automated management of its elements. Expert systems on the basis of declarative programming languages are applied to synthesis of similar structures. **Materials and methods.** As the tool for definition of the knowledge base about the field of restructuring of structure of management calculation of expressions and language of a predicate logic, that is a logic theory of first order is used. Then, the problem of reconfiguration of hierarchical structure of management system can be presented doubly. First, as a problem of definition of the changes of the known rational hierarchical structure providing minimum loss from the arisen functional failures. Secondly, as a problem of creation of new rational structure which provides optimum use of the resources used in the course of achievement of definite purposes in the changing conditions. **Results.** As a result of a research, on the basis of de Morgan's law the factors influencing a system status of organizational management in general are defined. The necessary structure of solvable tasks of all hierarchical structure is defined by extent of influence of different factors on characteristics of structure of management. **Conclusion.** The operation of the system is to select a set of adjustable parameters or a set of tested options. To do this, a decision is made on what indicator it is advisable to judge the effectiveness of the information system. After that, the question of how to change the operating mode of the system, its structure or parameter values can achieve maximum efficiency is resolved. It is about choosing a set of adjustable parameters or a set of tested options. The system performance indicator is a deterministic function of the controlled parameters. This function is called the target or performance criterion of the system. Further, from a predetermined set of values of the set of adjustable parameters, select such a set of these values, at which the objective function takes the minimum (maximum) value.

Keywords: task, knowledge, models, rules, system, status, resource, elements, experts

For citation: Belousov V.E., Dorofeev D.V., Mozharova L.A. Application of methods of information engineering for change of structure of multilayer systems of organizational management. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2022;22(4):27–37. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220403

Введение

Информационные системы, подлежащие исследованию, весьма разнообразны по своей структуре, сложности, конкретному назначению и обладают большим разнообразием. Однако если отвлечься от конкретного производственного смысла процессов, протекающих в системах и их отдельных узлах, то логические и вычислительные правила функционирования элементов систем будут не столь разнообразны. Во многих случаях, казалось бы, совсем разные «по конкретному смыслу» элементы функционируют на основании одних и тех же законов. Это дает возможность при построении автоматных моделей сложных систем выделить определенное, сравнительно небольшое количество стандартизированных автоматов (вероятностных и детер-

минированных), так что построение моделей довольно широкого класса систем оказывается возможным лишь с помощью определенного набора автоматов этих типов [1].

Постановка задачи автоматной интерпретации

Разберем различные способы автоматной интерпретации моделей различных узлов информационных систем. При этом некоторые узлы будут имитироваться в виде отдельных автоматов, другие – с помощью небольших вероятностно-автоматных систем. Предварительное изучение отдельных свойств типовых узлов информационных систем дает возможность перейти в дальнейшем к описанию построения моделей довольно сложных систем. Одним из наиболее характерных свойств информационных систем является поступление на вход системы некоторых транзакций, которые в каждом отдельном случае могут иметь различный конкретный смысл. Как известно, правила формирования входящих потоков могут быть довольно разнообразными [2].

На практике активные и пассивные задержки транзакций внутри информационных систем в процессе их функционирования, как правило, сопровождаются влиянием различных специфических особенностей: блокировки, резервирования и др. Рассмотрим описание моделей ряда систем, обладающих такими особенностями. Попутно коснемся построения индикаторов, служащих для определения различных неслучайных характеристик моделей. Постараемся отразить две сходные особенности системы: блокировку на обслуживающий механизм и на поступление транзактов. Разберем случай, когда транзакты, поступившие в систему и заставшие обслуживающий механизм занятым, не покидают ее, а задерживаются, образуя очередь. Пусть промежутки времени между моментами поступления последовательных транзактов – взаимно независимые одинаково распределенные случайные величины, реализации которых можно рассматривать как реализации некоторой случайной величины ξ . Сделаем такое же предположение и относительно длительностей обслуживания, считая их реализациями случайной величины η . Очередь предполагается неограниченной [3].

Для того чтобы полностью охарактеризовать систему в каждый момент времени, необходимо задание трех ее временных характеристик. Они могут быть выбраны, например, следующим образом: 1) промежуток времени от момента t до момента поступления очередного транзакта; 2) промежуток времени от момента t до момента окончания обслуживания того транзакта, который обслуживается в момент t ; 3) количество транзактов, ожидающих в очереди, в момент времени t .

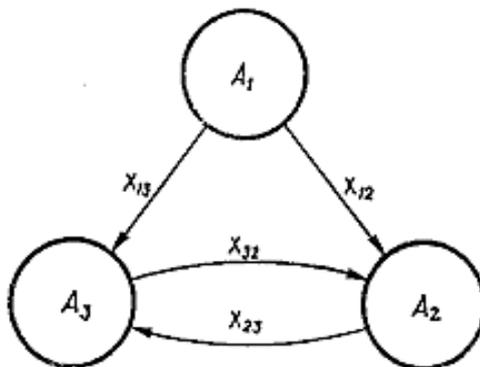
Эти три характеристики, очевидно, образуют Марковский вектор системы [4], следовательно, автоматную модель системы можно построить из трех автоматов A_1 , A_2 и A_3 , состояния которых отождествим соответственно с тремя этими временными характеристиками. Будем считать, что при значении выходного сигнала $x_1(t)$ автомата A_1 , равном 1, через одну единицу времени (в момент $t + 1$) поступит очередной транзакт. Далее, $x_2(t) = 1$ лишь в том случае, если обслуживающий механизм свободен в момент t или освободится к моменту времени $t + 1$. Выходной сигнал $x_3(t)$ равен 1, если в момент t в очереди имеются транзакты.

На основании такого выбора состояния автоматов и значений выходных сигналов систему функций выходов [5] можно представить в виде табл. 1.

Таблица 1
Система функций выходов
Table 1
System of functions of outputs

	1
$x_1(t)$	$a_1(t) \leq 1$
$x_2(t)$	$a_2(t) \leq 1$
$x_3(t)$	$a_3(t) > 0$

Структурный граф модели изображен на рисунке.



Структурный граф модели
Network diagram of execution of rules of expert system

Матрица алфавитов [6] имеет вид, представленный в табл. 2.

Таблица 2
Матрица алфавитов
Table 2
Matrix of alphabets

Р	Д	Д
Θ	Н	Д
Θ	Д	Н

Таблица условных функционалов переходов (ТУФП), устанавливающая соответствие между высказываниями и функционалами, представлена в следующем виде (табл. 3).

Таблица условных функционалов переходов
Table of conditional functionalities of transitions

Таблица 3
Table 3

A ₁	$a_1(t) > 1$	$a_1(t) \leq 1$	
	$a_1(t) - 1$	ξ	
A ₂	$a_2(t) > 1$	$a_2(t) \leq 1 \wedge x_1(t) + x_3(t) > 0$	$a_2(t) \leq 1 \wedge x_1(t) + x_2(t) = 0$
	$a_2(t) - 1$	η	0
A ₃	$u_1(t) + x(t)$		

В качестве вектора начальных состояний можно выбрать любые три числа, из которых первое – положительное целое, а второе и третье – натуральные. Исключение представляют лишь такие три числа, где при произвольном первом второе равно нулю, а третье отлично от нуля. Смысл такого исключения вполне ясен: когда в очереди имеются клиенты, обслуживающий механизм не может простаивать [7].

Поскольку в работе рассмотренной системы участвуют две независимые случайные величины ξ и η , то задание системы распределений случайных величин может осуществляться способом блокировки. Из всех возможных способов блокировки выберем два.

Задание системы распределений случайных величин способом блокировки

Блокировка входящего потока транзактов. В каждый момент времени t входящий поток, на который не действует блокировка, может быть заблокирован в течение промежутка времени случайной длительности γ с вероятностью p ($0 < p < 1$) или не заблокирован с противоположной вероятностью. Для определенности обозначим через τ двоичную случайную величину с распределением $\{1-p, p\}$. В момент окончания действия блокировки на вход поступает очередной клиент, и далее система продолжает функционировать нормально [8].

Блокировка обслуживающего механизма. Блокировка (выход из строя) происходит после отработки обслуживающим механизмом случайного количества β рабочих единиц времени [9].

Время простоя в эту величину не входит. После выхода механизма из строя в течение случайного времени α происходит его восстановление (ремонт). Далее продолжается обслуживание транзакта, прерванное в момент выхода механизма из строя.

Найдем математическое ожидание промежутка простоя обслуживающего механизма при отсутствии блокировки (в исправном состоянии). Заметим, что ввиду возможности выхода из строя механизма только в рабочем состоянии каждый из таких промежутков будет заканчиваться лишь при поступлении новых транзактов в систему, но не при прекращении действия блокировки обслуживающего механизма.

Основная часть модели состоит из шести автоматов [10], которые обозначим A_1, A_2, \dots, A_6 . Автоматы индикатора (их три) обозначим буквой U с соответствующим индексом. Как всегда, построение модели начнем с определения конкретного смысла состояний автоматов.

Положим: $a_1(t)$ – промежуток времени, оставшийся в момент времени t до момента поступления очередного транзакта; $a_2(t)$ – промежуток времени, оставшийся от момента t до момента окончания обслуживания очередного транзакта, если в момент t имеется некоторый транзакт, поступивший на обслуживание, независимо от того, является обслуживающий механизм в данный момент исправным или нет, в противном случае $a_2(t) = 0$; $a_3(t)$ – количество транзактов, ожидающих обслуживания в момент времени t ; $a_4(t)$ – промежуток времени, оставшийся от момента t до момента окончания блокировки входящего потока, если в этот момент действует блокировка, в противном случае $a_4(t) = 0$; $a_5(t)$ – значение качественной компоненты блокировки обслуживающего механизма в момент времени t , если в этот момент действует блокировка, то $a_5(t) = 1$, в противном случае $a_5(t) = 0$; $a_6(t)$ – значение количественной компоненты блокировки обслуживающего механизма в момент времени t , т. е. промежуток времени от момента t до момента очередной смены качественного состояния блокировки механизма; $u_1(t)$ – накопленное за промежуток времени от начала функционирования модели до момента t суммарное время простоя обслуживающего механизма в исправном состоянии; $u_2(t)$ – накопленное за этот же промежуток времени суммарное количество промежутков незанятости обслуживающего механизма; $u_3(t)$ – приближенное значение математического ожидания длительности простоя обслуживающего механизма в исправном состоянии, полученное путем усреднения по промежутку времени $(0, t - 1)$.

Такое задание состояний автоматов дополним следующими замечаниями.

1. Ввиду того, что по принятому условию задачи в момент окончания действия блокировки на входящий поток на вход системы всегда поступает транзакт, при наличии этой блокировки промежуток времени до поступления очередного транзакта определяется состоянием автомата A_4 , а не состоянием автомата A_1 последнее в рассматриваемом случае теряет смысл и может быть выбрано произвольно [11, с. 203–211].

2. Поскольку по условию задачи предполагается, что в каждый момент времени, когда на входящий поток не действует блокировка, последняя может наступить с одинаковой вероятностью, для описания этой блокировки достаточно выбрать лишь одну временную характеристику. Действительно, эту характеристику можно задать так: в момент действия блокировки она совпадает со значением промежутка времени, оставшегося до окончания действия блокировки, в противном случае равна нулю [12]. В качестве этой компоненты в модели фигурирует состояние автомата A_4 . С блокировкой обслуживающего механизма дело обстоит совершенно иначе. Состояние блокировки и состояние ее отсутствия наступают или не наступают в зависимости от того, сколько времени прошло с момента наступления или окончания блокировки, поэтому для полного описания блокировки обслуживающего механизма необходимо ввести две временные характеристики: качественную и количественную, как это сделано в рассматриваемой модели путем добавления автоматов A_5 и A_6 .

3. В каждый момент времени обслуживающий механизм может находиться, будучи исправным [13], либо в рабочем состоянии, либо в состоянии простоя, либо быть в неисправном (заклинившим) состоянии. Нас интересуют лишь промежутки времени простоя обслуживающего механизма в исправном состоянии. Такие промежутки могут иметь произвольную целочисленную длительность. В процессе функционирования модели автомат U_1 является накопителем количества единиц времени, когда обслуживающий механизм простаивал в исправном состоянии, а автомат U_2 – числа промежутков времени непрерывного нахождения механизма в этом состоянии.

Из условия задачи пока не ясно, как должен действовать транзакт, который прибыл в момент, когда обслуживающий механизм был заблокирован и в системе не было ни одного транзакта (в том числе частично обслуженного), т. е. должен ли он находиться в очереди до прекращения действия блокировки или поступить к обслуживаемому механизму и продолжать ожидание там. С точки зрения содержания эти два случая неразличимы, так как безразлично, где происходит пассивная задержка [14]. Однако с точки зрения алгоритмического описания модели здесь имеется существенная разница, например для определения состояний автоматов A_2 и A_3 . Следовательно, при построении модели необходимо принять одну из этих версий за истину. Будем придерживаться того мнения, что в указанном случае ожидание происходит непосредственно в обслуживающем приборе, а не в очереди [15].

Обозначим выходные сигналы автоматов A_1, A_2, \dots, A_6 буквой x с индексом, соответствующим номеру автомата, и указанием на момент времени. Выходные сигналы автоматов индикатора обозначим так же, как внутренние состояния этих автоматов.

Пусть $x_1(t)$ – сигнал, принимающий значение 1 в момент, предшествующий поступлению транзакта на вход системы вследствие естественного течения входящего потока (а не вследствие прекращения блокировки этого потока), и значение 0 – в противном случае; $x_2(t)$ – сигнал, равный 0, когда в момент t обслуживающий механизм свободен, 1, когда он занят, но освободится через единицу времени, и 2 – в остальных случаях; $x_3(t)$ – сигнал, равный 1 при наличии в очереди хотя бы одного транзакта и 0 – в противном случае; $x_4(t)$ – сигнал, равный 0, когда блокировка входящего потока отсутствует, 1, когда действие блокировки через единицу времени закончится, и 2 – в остальных случаях; $x_5(t)$ – сигнал, совпадающий в каждый момент времени с качественной компонентой описания блокировки обслуживаемого механизма, т. е. с состоянием автомата A_5 ; $x_6(t)$ – сигнал, принимающий значение 1, если до очередной смены качественной компоненты описания этой блокировки остается точно одна единица времени, и значение 0 – в противном случае.

Построим систему функции выходов для двоичных сигналов (табл. 4).

Таблица 4
Система функции выходов
для двоичных сигналов
Table 4
The system of function of outputs
for binary signals

	1
$x_1(t)$	$a_1(t) = 1$
$x_3(t)$	$a_3(t) > 0$
$x_5(t)$	$a_5(t) = 1$
$x_6(t)$	$a_6(t) = 1$

Для автоматов индикатора функции выходов уже определены путем принятия предположения об их тождественности состояниям соответствующих автоматов. Для упрощения записи ТУФП введем промежуточные величины: $y_1(t)$ – величина, равная 1, если в момент времени $t + 1$ должен поступить транзакт за счет прекращения действия блокировки, и равная 0 – в противном случае; $y_2(t)$ – величина, равная 1 в том случае, если в момент времени $t + 1$ обслуживающий механизм способен принять одного транзакта, включая и тот случай, когда действует блокировка этого механизма, и 0 – в остальных случаях; $z(t)$ – суммарное количество транзактов, находящихся в очереди в момент t либо поступающих в систему в этот момент времени в порядке нормального течения входящего потока или ввиду прекращения действия блокировки.

Для вычисления значений промежуточных величин имеем следующие формулы:

$$\begin{aligned}
 y_1(t) &= \begin{cases} 1 & \text{при } x_4(t) = 1, \\ 0 & \text{при } x_4(t) \neq 1; \end{cases} \\
 y_2(t) &= \begin{cases} 1 & \text{при } x_2(t) = 0 \text{ или } x_2(t) = 1 \text{ и } x_5(t) = 0, \\ 0 & \text{при } x_2(t) = 2 \text{ или } x_2(t) = 1 \text{ и } x_5(t) = 1. \end{cases}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Выражение для $y_2(t)$, как нетрудно убедиться, можно переписать в более простом виде:

$$y_2(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } x_2(t) + x_5(t) \leq 1, \\ 0 & \text{при } x_2(t) + x_5(t) \geq 2, \end{cases} \quad (2)$$

или

$$y_2(t) = 1 - \max\{0, \min\{1, x_2(t) + x_5(t) - 1\}\}. \quad (3)$$

ТУФП представляется в виде табл. 5:

Таблица 5

ТУФП

Table 5

TUFP

A_1	$a_1 > 1 \wedge x_4 = 0$	$a_1 > 1 \wedge x_4 = 0 \vee x_4 = 1$	$x_4 = 2$
	$a_1 - 1$	ξ	0
A_2	$a_2 > 1 \vee a_2 = 1 \wedge x_5 = 1$	$z > 0 \wedge (a_2 \leq 1 \wedge x_5 = 0 \vee a_2 = 0 \wedge x_5 = 1)$	$z = 0 \wedge (a_2 \leq 1 \wedge x_5 = 0 \vee a_2 = 0 \wedge x_5 = 1)$
	$a_2 + x_5 - 1$	η	0
A_3	$\max\{0, a_3 + x_1 + y_1 - y_2\}$		
A_4	$a_4 > 0$	$a_4 = 0$	
	$a_4 - 1$	$\tau\gamma$	
A_5	$a_5 = 0 \wedge x_2 = 0$	$a_5 = 0 \wedge x_2 > 0$	$a_5 = 1$
	0	x_6	$1 - x_6$
A_6	$a_6 > 1 \wedge x_5 = 0 \vee a_6 > 1 \vee x_5 = 0 \wedge x_2 > 0$	$a_6 \geq 1 \wedge x_5 = 0 \wedge x_2 = 0$	$a_6 = 1 \wedge x_5 = 1$
	$a_6 - 1$	a_6	β
U_1	$u_1 + (1 - x_5) \max\{0, 1 - x_2\}$		
U_2	$z > 0$	$z = 0$	
	$u_2 + \max\{0, 1 - x_2\} (1 - x_5)$	u_2	
U_3	$u_1 : \max\{1, u_2\}$		

Рассмотрим полученный вариант подробнее.

Автомат A_1 . Если в момент t блокировка входящего потока не действует и до поступления очередного транзакта остается промежуток времени, превышающий единицу, то естественно, что состояние автомата за единичный промежуток времени уменьшится на единицу, т. е.

$$a_1(t + 1) = a_1(t) - 1 \text{ при } x_4(t) = 0 \text{ и } a_1(t) > 1. \quad (4)$$

Если в момент t также не было блокировки, но время, оставшееся до поступления транзакта, равно единице, то в следующий момент времени транзакт поступит и до поступления очередного останется случайный промежуток времени, совпадающий с одной из реализаций случайной величины ξ .

Совершенно тот же результат будет, если в момент времени t действует блокировка на входящий поток и до окончания ее действия остается одна единица времени ($x_4(t) = 1$) независимо от состояния автомата A_1 . Если в момент t на входящий поток действует блокировка и до окончания этого действия остается промежуток, превышающий единицу времени, что может случиться тогда и только тогда, когда $x_4(t) = 2$, то на основании сделанного выше замечания состояние автомата A_1 можно выбрать произвольно. Это осуществимо при предположении, что $a_1(t) = 0$.

Автомат A_2 . Что касается изменения состояния этого автомата, то возможны три результата:

1) состояние автомата уменьшится на величину, противоположную значению сигнала $x_5(t)$, т. е.

$$a_2(t + 1) = a_2(t) - (1 - x_5(t)) = a_2(t) + x_5(t) - 1; \quad (5)$$

2) начнется обслуживание очередного транзакта, т. е. в момент $t + 1$ состояние автомата совпадает с одной из реализаций случайной величины η ;

3) в момент $t + 1$ обслуживающий механизм попадет в состояние простоя (будучи исправным или нет), т. е. $a_2(t + 1) = 0$.

Первый из перечисленных результатов возможен в двух случаях: когда до окончания обработки обслуживаемого транзакта остается промежуток, больший одной единицы времени (при наличии или отсутствии блокировки), и когда при наличии блокировки этот промежуток равен единице.

Второй результат имеет место также в двух случаях: когда при отсутствии блокировки остаточное время обслуживания не превышает единицы и в этот момент времени произойдет поступление транзакта, если таковые имеются в очереди ($z(t) > 0$), а также когда условие $z(t) > 0$ наличия или поступления клиентов при незанятости обслуживающего прибора ($a_2(t) = 0$) сопровождается информацией о наличии в момент t ($x_5(t) = 1$) действия блокировки на обслуживающий механизм.

Третий, нулевой, результат имеет место тоже в двух случаях: когда при отсутствии блокировки ($x_5(t) = 0$) и фактической ($a_2(t) = 0$) или ожидающейся ($a_2(t) = 1$) незанятости обслуживающего механизма нет возможных претендентов на обслуживание ($z(t) = 0$) и когда незанятость механизма и отсутствие заявок на обслуживание сопровождаются наличием в момент t блокировки механизма.

Автомат A_3 . Исходим из основного принципа формирования очереди изложенного выше. В этом случае количество прибывающих транзактов (0 или 1) совпадает со значением суммы $x_1(t) + y(t)$. В момент времени t из очереди может убыть (для обслуживания) один транзакт или не убыть ни одного. Эту величину обозначим через $y_2(t)$.

Таким образом, имеем

$$a_3(t+1) = \max\{0, a_3(t) + x_1(t) + y_1(t) - y_2(t)\}, \quad (6)$$

когда такое убытие происходит.

Автомат A_4 . Если в момент t на входящий поток действует блокировка ($a_4(t) > 0$), то в следующий момент времени $t+1$ ее остаточная длительность уменьшится на единицу, в противном случае в момент $t+1$ блокировка будет отсутствовать с вероятностью, равной $(1-p)$, или с вероятностью p начнется новый блокировочный период, причем его остаточная длительность в этом случае совпадет с одной из реализаций случайной величины γ . Следовательно, при $a_4(t) = 0$ новое состояние автомата A_4 можно изобразить в виде произведения $\tau\gamma$ случайных сомножителей τ и γ .

Автомат A_5 . Если в момент t на обслуживающий механизм блокировка не действует ($a_5(t) = 0$) и этот механизм свободен ($x_2(t) = 0$), то естественно, что в момент времени $t+1$ блокировки также не будет. Если при отсутствии блокировки в момент t и занятости обслуживающего механизма остаточное время безблокировочного периода равно единице ($x_6(t) = 1$), то в момент $t+1$ наступит новый период блокирования. Если же при этом остаточное безблокировочное время больше единицы ($x_6(t) > 1$), то блокировка не наступает. В этом случае новое состояние автомата A_5 можно записать так: $a_5(t+1) = x_6(t)$.

Если в момент t действует блокировка обслуживания ($a_5(t) = 1$), то состояние автомата A_5 в момент $t+1$ примет значение, противоположное значению сигнала $x_6(t)$, т. е. $a_5(t+1) = 1 - x_6(t)$.

Автомат A_6 . Рассмотрим случай, когда состояние автомата не изменяется. Очевидно, что это происходит только тогда, когда в момент t отсутствует блокировка обслуживания ($x_5(t) = 0$), обслуживающий механизм простаивает ($x_2(t) = 0$) и остаточная часть безблокировочного периода больше или равна единице. Следовательно, $a_6(t+1) = a_6$.

В двух остальных случаях состояние автомата может уменьшиться на единицу. Эти случаи такие:

- 1) блокировка обслуживания имеет место ($x_5(t) = 1$) и остаточное время блокировочного периода превышает единицу;
- 2) блокировка не действует ($x_5(t) = 0$), обслуживающий механизм занят ($x_2(t) > 0$) и остаточный безблокировочный период превышает единицу.

Если в момент t блокировка механизма имеет место и ее остаточная длительность равна единице, то в следующий момент времени $t+1$ наступает безблокировочный период и его остаточная длительность совпадает с одной из реализаций случайной величины α .

При отсутствии блокировки ($x_5(t) = 0$), занятости механизма ($x_2(t) > 0$) и остаточном без-

блокировочном времени, равном единице, в момент $t + 1$ начинается блокировка и ее остаточное время совпадает с реализацией случайной величины α .

Автомат U_1 . На основании определения состояние этого автомата должно увеличиваться на единицу лишь тогда, когда обслуживающий механизм простаивает, не будучи заблокирован, т. е. добавления единицы к $u_1(t)$ не происходит, когда действует блокировка ($x_5(t) = 1$) или обслуживающий механизм занят ($x_2(t) > 0$). Это можно учесть, прибавляя к «старому» состоянию автомата такое выражение, зависящее от x_2 и x_5 , которое равно единице во всех случаях, кроме указанных. Нетрудно увидеть, что именно таким выражением является произведение

$$(1 - x_5(t)) \max\{0, 1 - x_2(t)\}. \quad (7)$$

Автомат U_2 . По определению состояние этого автомата в момент времени t должно совпадать с количеством промежутков незанятости обслуживающего механизма при отсутствии блокировки. Такие промежутки можно подсчитывать либо по их началам, либо по их концам. Выберем последний способ. Следовательно, функционал для определения $u_2(t)$ должен быть составлен так, чтобы он подсчитывал количество переходов обслуживающего механизма из состояния простоя при исправности этого механизма в какое-либо другое состояние. Очевидно, что, если в момент t имеются транзакты, которые либо находятся в очереди, либо поступают в систему извне по той или другой причине, т. е. когда $z(t) = 0$, интересующий нас переход произойти не может и единица к $u_2(t)$ не прибавляется. В противном случае ($z(t) > 0$) к $u_2(t)$ единица прибавляется тогда и только тогда, когда механизм простаивает ($x_2(t) = 0$) и блокировки нет ($x_5(t) = 0$). Имеем

$$u_2(t + 1) = u_2(t) + \max\{0, 1 - x_2(t)\} (1 - x_5(t)). \quad (8)$$

Автомат U_3 . Вычислить приближенное значение математического ожидания периода простоя механизма в исправном (незаблокированном) состоянии можно, разделив суммарное время пребывания механизма в этом состоянии за какой-то достаточно большой промежуток времени T на количество промежутков непрерывного пребывания его в исправном состоянии за тот же период времени T . Чтобы в начале машинной реализации функционирования модели, когда еще $u_2(t) = 0$, не происходило автоматической остановки при делении на нуль, применяем символ \max .

Начальное состояние автоматов индикатора – нулевое. Для остальных автоматов можно выбрать произвольные начальные состояния, соответствующие реально возможной ситуации.

Заключение

Таким образом, схема решения задачи с помощью построенной автоматной модели такова. Прежде всего принимают решение, по какому показателю, в данном случае в свете требований решаемой задачи, целесообразно судить об эффективности работы информационной системы. После этого решается вопрос о том, за счет чего, за счет какого изменения режима работы системы, ее структуры или значений параметров можно добиться максимальной эффективности. Речь идет о выборе совокупности регулируемых параметров или совокупности испытываемых вариантов. Показатель эффективности работы системы является детерминированной функцией регулируемых параметров. Эта функция называется целевой или критерием эффективности системы. Вид целевой функции до начала исследования неизвестен. В противном случае не потребовалось бы применение имитационных методов. Решение любой задачи имитационного моделирования заключается в том, чтобы из заданного множества значений совокупности регулируемых параметров выбрать такую совокупность этих значений, при которой целевая функция принимает минимальное (максимальное) значение.

Список литературы

1. Бурков В.Н., Данев Б.К., Еналеев А.К. Большие системы: моделирование организационных механизмов. М.: Наука, 1989. 245 с.
2. Бурков В.Н., Кондратьев В.В. Механизмы функционирования организационных систем. М.: Наука, 1981. 301 с.
3. Белоусов В.Е., Кончаков С.А. Алгоритм для оперативного определения состояний объектов в многоуровневых технических системах // Экономика и менеджмент систем управления. 2015. № 3-2 (17). С. 227–232.

4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Издат. центр «Академия». 2003. 576 с.
5. Белоусов, В.Е., Нгуен Вьет Туан. Алгоритм выбора наилучшего варианта проведения натурного эксперимента в многокритериальных задачах моделирования сложных технических объектов // Системы управления и информационные технологии. 2016. № 1 (63). С. 55–59.
6. 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). Санкт-Петербург, 23–25 мая 2018 г.: сб. докл.: в 2 т. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. Т. 1. С. 355–358.
7. Белоусов В.Е., Нижегородов К.И., Соха И.С. Алгоритмы получения упорядоченных правил предпочтения в задачах принятия решений при планировании производственных программ // Управление строительством. 2019. № 1 (14). С. 105–110.
8. 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. 64–66.
9. 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. С. 78–83.
10. 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.
11. Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М. Анализ временных рядов и прогнозирование. М.: Финансы и статистика, 2001. 226 с.
12. Губко М.В., Караваев А.П. Согласование интересов в матричных структурах управления // Автоматика и телемеханика. 2001. № 10. С. 132–146.
13. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. М.: Высшая школа, 2004. 341 с.
14. Вапник В.Н. Восстановление зависимости по эмпирическим данным. М.: Наука, 1979. 295 с.
15. Hart O.D., Holmstrom B. Theory of contracts // Advances in economic theory. 5th world congress. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1987. P. 71–155.

References

1. Burkov V.N., Danev B.K., Enaleyev A.K. *Bol'shiye sistemy: modelirovaniye organizatsionnykh mekhanizmov* [Big systems: modeling of organizational mechanisms]. Moscow: Nauka; 1989. 245 p. (In Russ.)
2. Burkov V.N., Kondrat'yev V.V. *Mekhanizmy funktsionirovaniya organizatsionnykh sistem* [Mechanisms of functioning of organizational systems]. Moscow: Nauka; 1981. 301 p. (In Russ.)
3. Belousov V.E., Konchakov S.A. [Algorithm for operational definition of statuses of objects in multilayer technical systems]. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya*. 2015;3-2(17):227–232. (In Russ.)
4. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow: Publishing center “Akademiya”; 2003. 576 p. (In Russ.)
5. Belousov V.E., Nguyen Vyet Tuang [An algorithm of the choice of the best option of carrying out a natural experiment in multicriteria problems of modeling of difficult technical objects]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*. 2016;1(63):55–59. (In Russ.)
6. 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]. In: *XXI International conference on soft calculations and measurements (SCM'2018): in 2 vol.* St. Petersburg: SPSEU “LETI”; 2018. Vol. 1. P. 355–358. (In Russ.)
7. Belousov V.E., Nizhegorodov K.I., 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):105–110. (In Russ.)
8. Barkalov S.A., Burkov V.N., Porjadina V.L. Mechanisms of active examination in problems complex estimation. *Proceedings of Voronezh state university*. 2009;5(6):64–66. (In Russ.)

9. Barkalov S.A. Belousov V.E., Nizhegorodov K.A. The resource and time 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. P. 78–83. (In Russ.)
10. 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.
11. Afanas'yev V.N., Yuzbashev M.M. *Analiz vremennykh ryadov i prognozirovaniye* [Analysis of time series and forecasting]. Moscow: Finansy i statistika; 2001. 226 p. (In Russ.)
12. Gubko M.V., Karavaev A.P. Coordination of Interests in the Matrix Control Structures. *Automation and Remote Control*. 2001;62(10):1658–1672.
13. Gorelik A.L., Skripkin V.A. *Metody raspoznavaniya* [Recognition methods]. Moscow: Vysshaya shkola; 2004. 341 p. (In Russ.)
14. Vapnik V.N. *Vosstanovleniye zavisimosti po empiricheskim dannym* [Recovery of dependence according to empirical data]. Moscow: Nauka; 1979. 295 p. (In Russ.)
15. Hart O.D., Holmstrom B. Theory of contracts. In: *Advances in economic theory. 5th world congress*. Cambridge: Cambridge Univ. Press; 1987. P. 71–155.

Информация об авторах

Белусов Вадим Евгеньевич, канд. техн. наук, доц., заведующий базовой кафедрой кибернетики в системах организационного управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; belousov@vgasu.vrn.ru.

Дорофеев Дмитрий Валериевич, аспирант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; upr_stroy_kaf@vgasu.vrn.ru.

Можарова Лина Александровна, канд. техн. наук, доц., докторант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; upr_stroy_kaf@vgasu.vrn.ru.

Information about the authors

Vadim E. Belousov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of Basic Department of Cybernetics in the Systems of Organizational Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; belousov@vgasu.vrn.ru.

Dmitry V. Dorofeyev, Postgraduate Student of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; upr_stroy_kaf@vgasu.vrn.ru.

Lina A. Mozharova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Doctoral Student of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; upr_stroy_kaf@vgasu.vrn.ru.

Статья поступила в редакцию 15.09.2022

The article was submitted 15.09.2022

Управление в технических системах Control in technical systems

Научная статья
УДК 629.7.054.44
DOI: 10.14529/ctcr220404

О РАЗЛИЧИИ ПОКАЗАНИЙ ИСТИННОЙ ВОЗДУШНОЙ СКОРОСТИ МЕХАНИЧЕСКИМ УКАЗАТЕЛЕМ И СИСТЕМОЙ ВОЗДУШНЫХ СИГНАЛОВ

В.И. Панферов^{1,2}, tgsv@mail.ru
С.В. Панферов¹, panferovsv@susu.ru
А.М. Хаютин²
Н.А. Тренин²

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, Челябинск, Россия

Аннотация. Для повышения безопасности и эффективности обработки полетных заданий необходима достоверная информация о высотно-скоростных параметрах воздушного судна (ВС). В связи с этим задача изучения особенностей и совершенствования характеристик существующих измерителей данных параметров является вполне актуальной. **Цель исследования.** Рассматривается задача оценки различия показаний истинной воздушной скорости ВС механическим указателем и системой воздушных сигналов (СВС). **Материалы и методы.** Проанализированы методы измерения истинной воздушной скорости, применяемые на современных ВС. Установлено, что, несмотря на наличие новейших разработок, СВС, работающая в комплекте с приемниками воздушных давлений и температуры торможения, а также и датчиками углов атаки и скольжения, является в настоящее время наиболее распространенным измерителем истинной воздушной скорости. Используются также и механические указатели, включаемые в состав комбинированных указателей скорости (КУС). В соответствии с физикой явлений, имеющих место при полете, для вычисления истинной воздушной скорости необходимо знать температуру воздуха на высоте полета. В СВС эта температура определяется по измеряемой температуре торможения. В составе КУСов нет никаких измерителей температуры, в их конструкцию закладывается зависимость температуры от давления, имеющая место для международной стандартной атмосферы. Понятно, что это приводит к появлению методической погрешности измерения. **Результаты.** Получена формула, позволяющая определять различие показаний механического указателя и СВС. Показано, что данная разность является функцией температуры торможения (температуры наружного воздуха), полного и статического давлений на высоте полета. Проведены численные исследования, позволяющие оценить количественное расхождение показаний. Установлено, что разность показаний может достигать в эксплуатационных условиях несколько десятков м/с, что достаточно значимо. **Заключение.** Полученные результаты могут быть использованы при эксплуатации ВС, а также и при совершенствовании алгоритмического обеспечения бортовой цифровой вычислительной системы, являющейся центральным звеном пилотажно-навигационного комплекса.

Ключевые слова: истинная воздушная скорость, система воздушных сигналов, механический указатель, разность показаний, методическая погрешность

Для цитирования: О различии показаний истинной воздушной скорости механическим указателем и системой воздушных сигналов / В.И. Панферов, С.В. Панферов, А.М. Хаютин, Н.А. Тренин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 38–47. DOI: 10.14529/ctcr220404

ABOUT THE DIFFERENCE IN THE INDICATIONS OF THE TRUE AIR SPEED BY THE MECHANICAL INDEX AND THE AIR SIGNAL SYSTEM

V.I. Panferov^{1,2}, tgsiv@mail.ru

S.V. Panferov¹, panferovsv@susu.ru

A.M. Hayutin²

N.A. Trenin²

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin
Air Force Academy, Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Reliable information about the altitude and speed parameters of an aircraft (AC) is required to improve the safety and efficiency of flight missions. In this regard, the task of studying the features and improving the characteristics of existing meters of these parameters is quite relevant. **Purpose of the study.** The problem of estimating the difference between the readings of the true airspeed of an aircraft by a mechanical indicator and an air signal system (ASS) is considered. **Materials and methods.** Methods for measuring true airspeed used on modern aircraft are analyzed. It has been established that, despite the availability of the latest developments, SHS, operating in a set with air pressure and stagnation temperature receivers, as well as angle of attack and slip sensors, is currently the most common true airspeed meter. Mechanical indicators are also used, which are included in the composition of the combined speed indicators (KUS). In accordance with the physics of the phenomena that take place during flight, in order to calculate the true airspeed, it is necessary to know the air temperature at the flight altitude. In SHS, this temperature is determined from the measured stagnation temperature. There are no temperature meters in the composition of the KUSs, their design is based on the dependence of temperature on pressure, which takes place for the international standard atmosphere. It is clear that this leads to the appearance of a methodological measurement error. **Results.** A formula has been obtained that makes it possible to determine the difference in the readings of a mechanical indicator and SHS. It is shown that this difference is a function of the stagnation temperature (outside air temperature), total and static pressures at flight altitude. Numerical studies have been carried out to estimate the quantitative discrepancy between the readings. It has been established that the difference in readings can reach several tens of m/s under operating conditions, which is quite significant. **Conclusion.** The results obtained can be used in the operation of the aircraft, as well as in improving the algorithmic support of the onboard digital computer system, which is the central link of the flight and navigation complex.

Keywords: true airspeed, air signal system, mechanical indicator, reading difference, methodological error

For citation: Panferov V.I., Panferov S.V., Hayutin A.M., Trenin N.A. About the difference in the indications of the true air speed by the mechanical index and the air signal system. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(4):38–47. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220404

Введение

Актуальность вопросов повышения точности измерения высотно-скоростных параметров летательных аппаратов (ЛА) подчеркивается в большом количестве работ, например, в работах [1–9]. В связи с этим весьма важны как количественно-качественный анализ причин возникновения погрешностей измерения, так и способы повышения уровня комплексирования и интеграции информационно-измерительных систем самолета, а также и разработка новых принципов измерения.

Методы измерения истинной воздушной скорости

Как известно, одним из высотно-скоростных параметров воздушного судна (ВС) является его истинная воздушная скорость. Обычно для ее измерения используются КУСы (комбинированные указатели скорости) и системы воздушных сигналов (СВС). При этом КУСы «решают» задачу определения истинной воздушной скорости только по сигналам полного и статического давлений, формируемым с помощью приемников воздушных давлений (ПВД). Классическим СВС до-

полнительно нужна еще и информация о температуре торможения. Усовершенствованные СВС используют, кроме того, еще и датчики углов атаки и скольжения, это позволяет определить положение вектора истинной воздушной скорости относительно продольной оси ВС и уменьшить погрешности измерения полного и статического давлений.

Известны также и новые разработки как собственно измерителей истинной воздушной скорости, так и СВС в целом [10–16]. Так, например, хорошо известно [см., например, 17], что температура наружного воздуха T через температуру полностью заторможенного потока $T_{\text{ТОРМ}}$ вычисляется по следующей формуле:

$$T = T_{\text{ТОРМ}} - \frac{k-1}{2kR} w^2, \quad (1)$$

где w – истинная воздушная скорость; k – показатель адиабаты; R – газовая постоянная.

Нетрудно видеть, что уравнение (1) может быть переписано в следующем виде:

$$w = \sqrt{\frac{2k}{k-1} R (T_{\text{ТОРМ}} - T)}. \quad (2)$$

Как это отмечено в работе [10], в соответствии с формулой (2), измеряя T и $T_{\text{ТОРМ}}$, можно определить и истинную воздушную скорость ЛА. Однако все это осложняется тем, что определить температуру незаторможенного потока без того, чтобы хотя бы частично его не затормозить просто нельзя. Как указано в [10], можно устраниваться от необходимости измерения температуры полностью незаторможенного потока на высоте полета, если определять температуру в двух точках приемника с разными числовыми значениями коэффициентов торможения (с разными степенями заторможенности набегающего потока).

В [11–13] предложена вихревая СВС, решающая те же задачи, что и классическая СВС, однако работает она в комплекте с оригинальным вихревым датчиком аэродинамического угла и истинной воздушной скорости со встроенным приемником статического давления. В этом случае нет никакой необходимости в определении температуры торможения, так как все высотно-скоростные параметры ЛА вычисляются и без нее [11–13]. В вихревом датчике используется эффект образования и периодического срыва вихрей за телами, установленными специальным образом в набегающем воздушном потоке. Таким образом генерируются периодические импульсы давления, которые распространяются по потоку, образуя так называемые вихревые дорожки Кармана. При этом установлено, что частоты импульсов давления являются функциями истинной воздушной скорости и измеряемого аэродинамического угла, что и позволяет определить эти параметры. Однако в данном случае имеется такая особенность, что диапазон рабочих скоростей вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости ограничен дозвуковыми скоростями полета [11–13].

В вышерассмотренных случаях при измерении высотно-скоростных параметров используются либо вынесенные в набегающий воздушный поток и выступающие за обшивку фюзеляжа ЛА приемники воздушных давлений и температуры торможения, либо комбинированные вихревые датчики. Это нарушает аэродинамику самолета, причем в существенной мере при его маневрировании, и приводит к возникновению методических и инструментальных погрешностей [14–16]. Возможность создания СВС самолета с невыступающими приемниками первичной информации появляется при построении ее на основе ионно-меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости [14–16]. В данном случае измерение истинной воздушной скорости основано на определении интервала времени пролета ионной метки от точки ее генерации до места размещения приемных электродов. Ионная метка – это некоторая локальная область с ярко выраженным электростатическим зарядом, формируемым за счет ионизации воздуха с помощью миниатюрного искрового разрядника.

Как и в случае [11–13], если такой датчик дополнить приемником статического давления, то можно определить все необходимые высотно-скоростные параметры самолета. Причем для исключения влияния угла скольжения на работу канала угла атаки на самолете необходимо использовать два ионно-меточных датчика, устанавливаемых на правой и левой сторонах фюзеляжа. При этом следует отметить, что диапазон рабочих скоростей для СВС, работающей в комплекте с ионно-меточным датчиком аэродинамического угла и истинной воздушной скорости, в отличие от [11–13] не ограничен дозвуковыми скоростями полета.

Как в вихревой, так и в ионно-меточной СВС температура на высоте полета может быть определена по измеренной истинной воздушной скорости посредством решения следующего нелинейного уравнения:

$$T = \frac{w^2}{\frac{2k}{k-1} R \left[\left(\frac{w^2}{2RT} + 1 \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]} \quad (3)$$

Понятно, что здесь следует применить численный метод решения, что, очевидно, в общем усложняет алгоритмическое обеспечение СВС по сравнению с классическим вариантом.

По известной температуре на высоте полета и статическому давлению может быть определена и плотность воздуха в данной точке атмосферы, а затем и приборная скорость ВС и число Маха [11–14]. Относительная высота и вертикальная скорость в таких СВС вычисляются обычным образом по статическому давлению с коррекцией показаний по углам атаки и скольжения. В целом особенности алгоритмического обеспечения таких СВС указаны в работах [11–14].

Постановка задачи

В настоящее время СВС, работающая в комплекте с ПВД, приемником температуры торможения и датчиками углов атаки и скольжения, является наиболее распространенным измерителем истинной воздушной скорости (а также и всех высотно-скоростных параметров), кроме того, используются также и механические указатели истинной воздушной скорости, включаемые в состав КУСов. Применение КУСов объясняется тем, что механические указатели истинной воздушной скорости, как и все механические аэрометрические приборы, являются высоконадежными приборами прямого действия, они не требуют никаких источников питания, так как работают на энергии измеряемой среды. Кроме того, они характеризуются абсолютной помехоустойчивостью (помехоневосприимчивостью). При этом, конечно, понятно, что показания СВС являются более точными. Тем не менее механические приборы, как нам представляется, обязательно должны быть на любом воздушном судне, каким бы совершенным оно ни было, по крайней мере, они должны использоваться в качестве резервных приборов. Поэтому рассмотрим особенности измерения истинной воздушной скорости с помощью КУСов и вышеупомянутых СВС.

Обычно для определения истинной воздушной скорости w летательного аппарата (ЛА) используют следующее соотношение [17]:

$$w = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT \left[\left(\frac{\Delta p}{p_{ст}} + 1 \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]}, \quad (4)$$

где $\Delta p = p_{п} - p_{ст} = p_{дин}$ – динамическое давление на высоте полета (разность между полным $p_{п}$ и статическим $p_{ст}$ давлениями).

Как видно это из формулы (4), для вычисления истинной воздушной скорости необходимо знать температуру воздуха на высоте полета. Однако в полете непосредственно системой воздушных сигналов (СВС) измеряется не температура наружного воздуха, а температура торможения $T_{ТОРМ}$, поэтому есть смысл выразить вышеприведенную зависимость через $T_{ТОРМ}$.

Подставляя соотношение (1) в формулу (4), получим, что

$$w = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_{ТОРМ} \frac{\left[\left(\frac{\Delta p}{p_{ст}} + 1 \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]}{\left(\frac{\Delta p}{p_{ст}} + 1 \right)^{(k-1)/k}}} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_{ТОРМ} \left[1 - \left(\frac{\Delta p}{p_{ст}} + 1 \right)^{-(k-1)/k} \right]}. \quad (5)$$

Данная формула и используется в составе алгоритмического обеспечения типовых СВС, причем в ней достаточно детально отражается физика явлений и процессов, имеющих место при полете воздушного судна.

Подчеркнем еще раз, что из (4), в частности, следует, что для определения истинной воздушной скорости необходимо знать как статическое, так и динамическое давление, а также и темпе-

ратуру на высоте полета. Однако в составе механических указателей истинной воздушной скорости нет никаких измерителей температуры, тем не менее температуру на высоте полета в соответствии с физикой (см. формулу (4)) необходимо, как-то учитывать. В этом случае принимается следующее упрощение: в конструкцию механических измерителей закладывается зависимость температуры от давления, имеющая место для международной стандартной атмосферы (МСА). Понятно, что это приводит к появлению методической погрешности измерения, так как температура атмосферного воздуха непредсказуемо меняется как в течение суток, так и в различное время года, причем по-разному в разных пунктах и на разных высотах. Поэтому интересно было бы знать, насколько значима эта методическая погрешность, каких величин может достигать разность показаний СВС и механического указателя.

Решение задачи

Как известно [18, 19], зависимость температуры от давления, имеющая место для МСА, имеет вид

$$T = 288,1 \left(\frac{p_{CT}}{101325} \right)^{\uparrow} \left(\frac{\gamma R}{g} \right). \quad (6)$$

Здесь γ – градиент температуры, а g – ускорение свободного падения.

Как это следует из (6), по атмосферному давлению на высоте полета можно определить и температуру МСА для этого случая, т. е. и учет температуры на высоте полета для механических приборов также сводится к измерению статического (атмосферного) давления за бортом. Поэтому используемая в механических указателях формула для вычисления истинной воздушной скорости представляется следующим образом:

$$\begin{aligned} w &= \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT \left[\left(\frac{\Delta p}{p_{CT}} + 1 \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]} = \left| T = 288,1 \left(\frac{p_{CT}}{101325} \right)^{\uparrow} \left(\frac{\gamma R}{g} \right) \right| = \\ &= \sqrt{\frac{2k}{k-1} R \cdot 288,1 \cdot \left(\frac{p_{CT}}{101325} \right)^{\uparrow} \left(\frac{\gamma R}{g} \right) \left[\left(\frac{\Delta p}{p_{CT}} + 1 \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]}. \end{aligned} \quad (7)$$

Формула (7) является результирующей градуировочной зависимостью для механического указателя истинной воздушной скорости, входящего в состав КУСов. Как видно из (7), здесь все сводится к измерению сигналов статического и полного давлений на высоте полета.

Сравнивая формулы (4) и (7), нетрудно увидеть, что объективно существует различие показаний СВС и механических указателей истинной воздушной скорости. Поэтому интересно было бы исследовать, каков конкретно вид этого различия в зависимости от действительной температуры атмосферного воздуха, какие численные значения может принимать эта величина. При этом, конечно, понятно, что показания СВС являются более точными, поскольку в них учитывается реальная температура на высоте полета, а не та, что имеет место в стандартной атмосфере.

Как это следует из вышеизложенного, различие показаний механического указателя и СВС может быть вычислено по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \Delta w &= \sqrt{\frac{2k}{k-1} R \cdot 288,1 \cdot \left(\frac{p_{CT}}{101325} \right)^{\uparrow} \left(\frac{\gamma R}{g} \right) \left[\left(\frac{\Delta p}{p_{CT}} + 1 \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]} - \\ &- \sqrt{\frac{2k}{k-1} R \cdot T_{ТОРМ} \left[1 - \left(\frac{\Delta p}{p_{CT}} + 1 \right)^{(k-1)/k} \right]}. \end{aligned} \quad (8)$$

Как видно из формулы (8), Δw является функцией температуры торможения $T_{ТОРМ}$ (температуры наружного воздуха), полного $p_{П}$ и статического $p_{СТ}$ давлений на высоте полета.

На рис. 1 для различных абсолютных высот полета приведены кривые зависимости разности показаний механического указателя истинной воздушной скорости и СВС от температуры наружного воздуха: верхняя кривая для высоты 4000 м; средняя – для высоты 7000 м; нижняя кривая – для высоты 10 000 м. При этом действительное значение истинной воздушной скорости бы-

ло равно 800 км/ч. Как видно из рис. 1, с увеличением высоты полета разность показаний уменьшается. Как известно, в МСА на высоте в 4000 м температура воздуха равна 262,1 К, на высоте в 7000 м – 242,6 К, а на высоте в 10 000 м – 223,1 К. Как видно из рис. 1, при таких значениях действительных температур атмосферного воздуха разность показаний равна нулю, что так и должно быть.

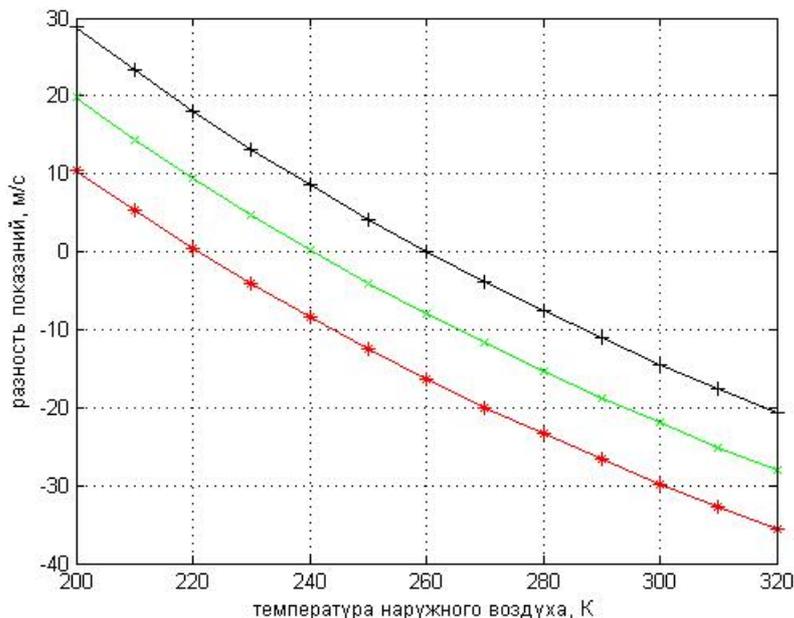


Рис. 1. Разность показаний механического указателя и СВС при $w = 800$ км/ч
Fig. 1. The difference between the readings of the mechanical pointer and the SHS at $w = 800$ km/h

На рис. 2 для действительного значения истинной воздушной скорости в 600 км/ч приведены кривые зависимости разности показаний механического указателя и СВС от температуры наружного воздуха при абсолютной высоте полета в 4000 м – верхняя кривая; в 7000 м – средняя кривая и в 10 000 м – нижняя кривая. Как видно из рис. 2, общая картина различий практически не изменилась, уменьшилось только числовое значение разности показаний.

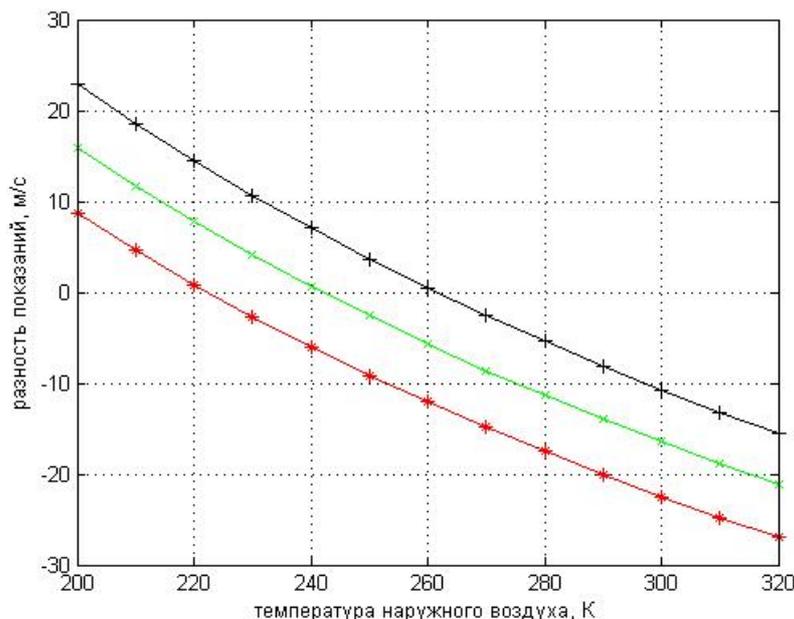


Рис. 2. Разность показаний СВС и механического указателя при $w = 600$ км/ч
Fig. 2. The difference between the readings of the SHS and the mechanical pointer at $w = 600$ km/h

На рис. 3 приведены кривые зависимости разности показаний механического указателя и СВС от температуры наружного воздуха при абсолютной высоте полета в 4000 м – верхняя кривая; в 7000 м – средняя кривая и в 10 000 м – нижняя кривая. При этом действительное значение истинной воздушной скорости было равно 400 км/ч. Как здесь следует отметить, разность показаний уменьшилась по сравнению с условиями рис. 1 примерно в два раза.

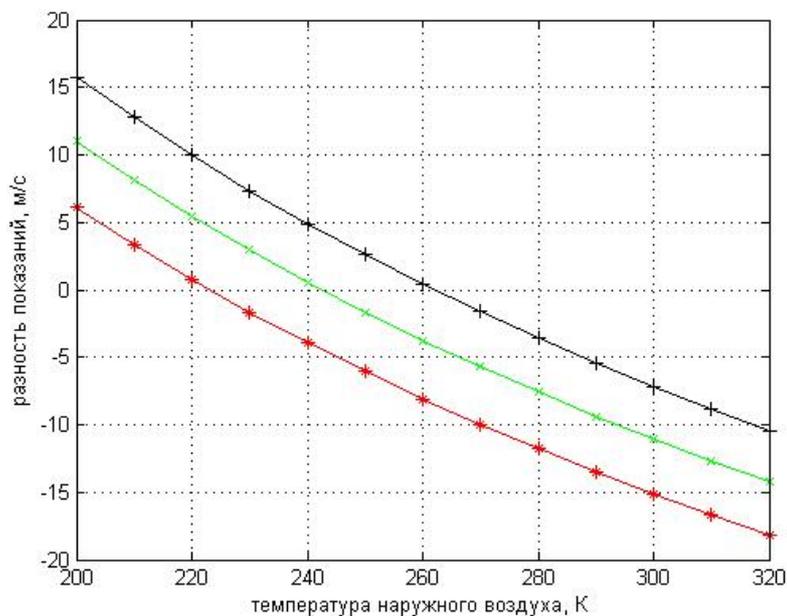


Рис. 3. Разность показаний механического указателя и СВС при $w = 400$ км/ч
Fig. 3. The difference between the readings of the mechanical pointer and the SHS at $w = 400$ km/h

На рис. 4 приведены кривые зависимости разности показаний механического указателя и СВС от температуры наружного воздуха при абсолютной высоте полета в 7000 м, но при различных значениях истинной воздушной скорости полета: кривая, помеченная плюсиками, – 400 км/ч, кривая, помеченная крестиками, – 600 км/ч, а кривая, помеченная звездочками, – 800 км/ч. Как видно из рис. 4, с увеличением скорости полета разность показаний увеличивается.

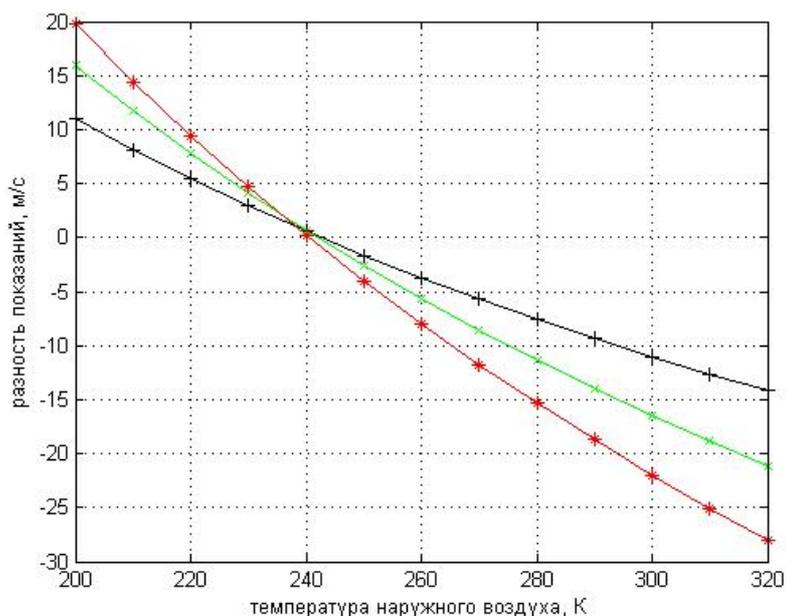


Рис. 4. Разность показаний СВС и механического указателя на высоте в 7000 м и различных скоростях полета
Fig. 4. The difference between the readings of the SHS and the mechanical pointer at an altitude of 7000 m and different flight speeds

Выводы

Получена формула для определения различия показаний механического указателя и типовой СВС, работающей в комплекте с приемниками воздушных давлений и температуры торможения. Установлено, что данная разность показаний является функцией температуры торможения (температуры наружного воздуха), полного и статического давлений на высоте полета. Причем с увеличением высоты полета и с уменьшением действительного значения истинной воздушной скорости разность показаний уменьшается.

Список литературы

1. Гришин И.А., Михалевич О.А. Проблема измерения высотно-скоростных параметров полета современного самолета // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии в образовательном процессе». Краснодар: Изд-во Краснодарского высшего военного авиационного училища летчиков им. А.К. Серова, 2017. С. 66–71.
2. Пономарев А.И., Сорокин М.Ю. Комплексование результатов измерения высотно-скоростных параметров в системе // Автоматизация процессов управления. 2021. № 2 (64). С. 18–22. DOI: 10.35752/1991-2927-2021-2-64-18-22
3. Корнилов А.В. Методы повышения точности измерений значений параметров полета летательного аппарата резервной системой ориентации: автореф. ... дис. канд. техн. наук. СПб.: Изд-во НИУ ИТМО, 2013. 20 с.
4. Олейник А.И. Алгоритмическое обеспечение информационного комплекса высотно-скоростных параметров полета самолета // Авиакосмическое приборостроение. 2014. № 10. С. 22–27.
5. Харьков В.П. Дискретно-непрерывный алгоритм определения высотно-скоростных параметров полета ЛА // Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии». М.: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2019. С. 330–333.
6. Алмазов В.В., Макаров Н.Н., Сорокин М.Ю. Оценка характеристик аэрометрических систем // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19, № 1 (2). С. 385–390.
7. Никитин А.В., Солдаткин В.В., Солдаткин В.М. Повышение помехоустойчивости измерения высотно-скоростных параметров на борту вертолета // Известия вузов. Авиационная техника. 2016. № 4. С. 131–137.
8. Судаков А.И., Геращенко В.В., Котляров С.А. Анализ проблемы измерения высотно-скоростных параметров вертолета // Решетневские чтения: Материалы XXI Международной научно-практической конференции. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева. 2017. Ч. 1. С. 470–471.
9. Исследования по разработке системы определения высотно-скоростных параметров воздушно-космического самолета / М.П. Балашов, И.Ф. Белов, Д.П. Буйко и др. // Ученые записки ЦАГИ. 2002. Т. XXXIII, № 1-2. С. 120–128.
10. Ефимов И.П. Авиационные приборы: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2018. 255 с.
11. Ефремова Е.С. Построение, алгоритмы и оценка точности вихревой системы воздушных сигналов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2015. Т. 71, № 5. С. 129–135.
12. Солдаткин В.М., Солдаткина Е.С. Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости // Известия вузов. Авиационная техника. 2012. № 4. С. 56–59.
13. Ефремова Е.С., Солдаткин В.М. Теоретические основы построения и погрешности системы воздушных сигналов на основе вихревого метода // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 10. С. 192–199. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-10-192-199
14. Крылов Д.Л., Солдаткина Е.С. Система воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока // Известия вузов. Авиационная техника. 2015. № 4. С. 99–104.
15. Ганеев Ф.А., Солдаткин В.М. Ионно-меточный датчик аэродинамического угла и воздушной скорости с логометрическими информативными сигналами и интерполяционной схемой обработки // Известия вузов. Авиационная техника. 2010. № 3. С. 46–50.
16. Ганеев Ф.А. Синтез структуры и алгоритм преобразования времяпролетного ионно-меточного датчика воздушной скорости и угла атаки // Известия вузов. Авиационная техника. 2006. № 4. С. 53–56.

17. Панферов В.И., Тренин Н.А., Хаютин А.М. Авиационные приборы и пилотажно-навигационные комплексы: учеб. пособие: в 3 ч. Челябинск: Филиал ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. Ч. I. 145 с.

18. Панферов В.И., Панферов С.В., Хаютин А.М. Об особенностях определения высоты механическим высотомером и системой воздушных сигналов // Военный научно-практический вестник. 2020. № 1 (12). С. 46–52.

19. Об особенностях определения истинной воздушной скорости механическим указателем и системой воздушных сигналов / В.И. Панферов, С.В. Панферов, А.М. Хаютин, С.И. Черепанов // Военный научно-практический вестник. 2020. № 2 (13). С. 55–60.

References

1. Grishin I.A., Mikhalevich O.A. [The problem of measuring the altitude-speed parameters of the flight of a modern aircraft]. In: *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Innovatsionnyye tekhnologii v obrazovatel'nom protsesse"* [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference "Innovative technologies in the educational process"]. Krasnodar: Publishing house of the Krasnodar Higher Military Aviation School named after A.K. Serov; 2017. P. 66–71. (In Russ.)

2. Ponomarev A.I., Sorokin M.Yu. Integration of the measured altitude-speed performances in the system. *Automation of control processes*. 2021;2(64):18–22. (In Russ.) DOI: 10.35752/1991-2927-2021-2-64-18-22

3. Kornilov A.V. *Metody povysheniya tochnosti izmereniy znacheniy parametrov poleta letatel'nogo apparata rezervnoy sistemoy oriyentatsii: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Methods for improving the accuracy of measuring the values of the flight parameters of an aircraft with a backup attitude control system. Abstract of cand. sci. diss.]. St. Petersburg: NRU ITMO Publ.; 2013. 20 p. (In Russ.)

4. Oleinik A.I. [Algorithmic support of the information complex of the high-altitude-speed parameters of the aircraft flight]. *Aerospace instrument-making*. 2014;(10):22–27. (In Russ.)

5. Kharkov V.P. [Discrete-continuous algorithm for determining the altitude-speed parameters of an aircraft flight]. In: *Sbornik trudov XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Innovatsionnyye, informatsionnyye i kommunikatsionnyye tekhnologii"* [Proceedings of the XVI International scientific and practical conference "Innovative, information and communication technologies"]. Moscow: Assotsiatsiya vypusnikov i sotrudnikov VVIA im. prof. Zhukovskogo; 2019. P. 330–333. (In Russ.)

6. Almazov V.V., Makarov N.N., Sorokin M.Yu. Assessment of aero metric systems characteristics. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2017;19(1(2)):385–390. (In Russ.)

7. Nikitin A.V., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M. Improving the noise stability of measuring the altitude and speed parameters aboard a helicopter. *Russian Aeronautics*. 2016;59(4):587–594. DOI: 10.3103/S1068799816040231

8. Sudakov A.I., Gerashchenko V.V., Kotlyarov S.A. [Analysis of the problem of measuring the altitude and speed parameters of a helicopter]. *Reshetnevskiy chteniya: Materialy XXI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Reshetnev Readings: Proceedings of the XXI International scientific and practical conference]. Krasnoyarsk: Reshetnev Siberian State University of science and technology; 2017. Part 1. P. 470–471. (In Russ.)

9. Balashov M.P., Belov I.F., Buyko D.P., Kobzev V.I., Petunin A.N., Ponomarev L.F. [Research on the development of a system for determining the altitude and speed parameters of an aerospace aircraft]. *Uchenyye zapiski TSAGI* [Scientific notes of TsAGI]. 2002;XXXIII(1-2):120–128. (In Russ.)

10. Efimov I.P. *Aviatsionnyye pribory: uchebnoye posobiye* [Aviation devices: textbook]. Ulyanovsk: UISTU; 2018. 255 p.

11. Efremova E.S. [Construction, algorithms and estimation of the accuracy of the vortex system of air signals]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2015;71(5):129–135. (In Russ.)

12. Soldatkin V.M., Soldatkina E.S. Vortex sensor of aerodynamic angle and true airspeed. *Russian Aeronautics*. 2012;55(4):402–407. DOI: 10.3103/S1068799812040149

13. Efremova E.S., Soldatkin V.M. Theoretical foundations of building and errors of the air data system based on vortex method. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskoye nauki*. 2021;(10):192–199. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2021-10-192-199

14. Krylov D.L., Soldatkina E.S. System of air signals of aircraft with stationary non-protrusive flow receiver. *Russian Aeronautics*. 2015;58(4):466–471. DOI: 10.3103/S1068799815040182

15. Ganeev F.A., Soldatkin V.M. Ion-marking aerodynamic angle and airspeed sensor with logometric informative signals and interpolation processing scheme. *Russian Aeronautics*. 2010;53(3):312–319. DOI: 10.3103/S1068799810030116

16. Ganeyev F.A. Synthesis of a structure and a transformation algorithm for the aircraft time-of-flight ion-marking airspeed and angle-of-attack sensor. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*. 2006;(4):53–56. (In Russ.)

17. Panferov V.I., Trenin N.A., Hayutin A.M. *Aviatsionnyye pribory i pilotazhno-navigatsionnyye komplekсы: uchebnoye posobiye: v 3 ch. Ch.I.* [Aircraft instruments and flight-navigation complexes: A manual: in 3 parts. Part 1]. Chelyabinsk: Branch of VUZS VVS Air Force; 2018. 145 p. (In Russ.)

18. Panferov V.I., Panferov S.V., Hayutin A.M. On the peculiarities of determining the altitude by the mechanical altimeter and the system of air signals. *Voyenny nauchno-prakticheskiy vestnik*. 2020;1(12):46–52. (In Russ.)

19. Panferov V.I., Panferov S.V., Khayutin A.M., Cherepanov S.I. [On the features of determining the true airspeed by a mechanical indicator and a system of air signals]. *Voyenny nauchno-prakticheskiy vestnik*. 2020;2(13):55–60. (In Russ.)

Информация об авторах

Панферов Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; проф. кафедры авиационных комплексов и конструкций летательных аппаратов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, Челябинск, Россия; tgsiv@mail.ru.

Панферов Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; panferovsv@susu.ru.

Хаяутин Андрей Михайлович, канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры авиационных комплексов и конструкций летательных аппаратов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, Челябинск, Россия.

Тренин Николай Александрович, канд. воен. наук, начальник кафедры авиационных комплексов и конструкций летательных аппаратов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, Челябинск, Россия.

Information about the authors

Vladimir I. Panferov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Information and Analytical management support in social and economic systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; Prof. of the Department of Aviation Complexes and Aircraft Structures, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russia; tgsiv@mail.ru.

Sergey V. Panferov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Urban Planning, Engineering Networks and Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; panferovsv@susu.ru.

Andrey M. Hayutin, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Department of Aviation Complexes and Aircraft Structures, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russia.

Nikolai A. Trenin, Cand. Sci. (Military), Head of the Department of Aviation Complexes and Aircraft Structures, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russia.

Статья поступила в редакцию 22.04.2022

The article was submitted 22.04.2022

Инфокоммуникационные технологии и системы Infocommunication technologies and systems

Научная статья
УДК 621.372.543.2
DOI: 10.14529/ctcr220405

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

С.Н. Даровских, darovskikhsn@susu.ru

Д.Г. Фомин, fomindg@susu.ru

Н.В. Дударев, dudarevnn@susu.ru

Д.С. Клыгач, klygachds@susu.ru

М.Г. Вахитов, vakhitovmg@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Частотно-селективные СВЧ-устройства являются неотъемлемой частью антенно-фидерного тракта систем радиолокации и радионавигации, а также других инфокоммуникационных систем связи. Наибольшее распространение в указанных системах получили полосно-пропускающие фильтры. Они обеспечивают первичную селекцию полезного сигнала в смеси его с шумом. Перспективным направлением конструирования СВЧ полосно-пропускающих фильтров является их многослойное исполнение с применением полосковых и щелевых резонаторов. В настоящее время такая конструкция СВЧ полосно-пропускающих фильтров до конца не исследована. **Цель исследования.** Целью настоящей работы является экспериментальное исследование полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной полосково-щелевой технологии их построения. При этом экспериментальному исследованию подлежат их амплитудно-частотные характеристики, в том числе элементы матрицы рассеяния – коэффициент отражения и коэффициент передачи в диапазоне частот. **Материалы и методы.** В рамках настоящего исследования проведено компьютерное моделирование полосно-пропускающих фильтров в программе электродинамического моделирования, где были подобраны основные геометрические размеры элементов топологии фильтров и предварительно исследованы их амплитудно-частотные характеристики. При этом особенностью исследуемых полосно-пропускающих фильтров является применение в их конструкции отечественного СВЧ-материала на основе слоев фторопласта – ФАФ-4Д, что соответствует программе импортозамещения. По результатам компьютерного моделирования были изготовлены макеты полосно-пропускающих фильтров и проведено их экспериментальное исследование при использовании векторного анализатора цепей в диапазоне частот до 2 ГГц. **Результаты.** По результатам экспериментального исследования было определено хорошее качественное и количественное согласование теоретических и экспериментальных данных. Так, максимальное отклонение значения амплитуды коэффициента передачи, полученного по результатам компьютерного моделирования, от результатов эксперимента составляет не более 0,53 дБ; максимальное отклонение границ полосы пропускания составляет не более 30 МГц (3 % относительно центральной частоты). **Заключение.** Результаты экспериментального исследования доказывают возможность разработки и применения СВЧ полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной полосково-щелевой технологии.

Ключевые слова: многослойная полосково-щелевая технология, полосовой фильтр, СВЧ-измерения

Для цитирования: Экспериментальное исследование полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной технологии / С.Н. Даровских, Д.Г. Фомин, Н.В. Дударев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 48–55. DOI: 10.14529/ctcr220405

Original article

DOI: 10.14529/ctcr220405

EXPERIMENTAL STUDY OF BAND PASS FILTERS BASED ON MULTILAYER TECHNOLOGY

S.N. Darovskikh, darovskikhsn@susu.ru

D.G. Fomin, fomindg@susu.ru

N.V. Dudarev, dudarevnn@susu.ru

D.S. Klygach, klygachds@susu.ru

M.G. Vakhitov, vakhitovmg@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Frequency-selective microwave devices are an integral part of the antenna-feeder path of radar and radio navigation systems, and other infocommunication systems. Band pass filters are the most widely used in these systems. They provide primary selection of a useful signal mixed with noise. A promising direction in the design of microwave band pass filters is their multilayer design using strip and slot resonators. At present, such a design of microwave band pass filters has not been fully investigated. **Purpose of the study.** The purpose of this paper is an experimental study of band pass filters based on the multilayer strip-slot technology of their design. At the same time, their amplitude-frequency characteristics, including the reflection coefficient and the transmission coefficient in the frequency range, are subject to experimental study. **Materials and methods.** The computer simulation of band pass filters was carried out in electro-dynamics simulation program, where the main geometric dimensions of the filter topology elements were selected and their amplitude-frequency characteristics were preliminary studied. At the same time, a feature of the studied band pass filters is the use in their design of domestic microwave material based on fluoroplast layers – FAF-4D, which corresponds to the import substitution program. Based on the results of computer simulation, prototypes of band pass filters were made and their experimental study was carried out using a vector network analyzer in the frequency range up to 2 GHz. **Results.** According to the results of the experimental study, a good qualitative and quantitative agreement between theoretical and experimental data was determined. Thus, the maximum deviation of the gain amplitude value obtained from the results of computer simulation from the experimental results is no more than 0.53 dB; the maximum deviation of the bandwidth limits is no more than 30 MHz (3% relative to the center frequency). **Conclusion.** The results of the experimental study prove the possibility of developing and using microwave band pass filters based on multilayer strip-slot technology.

Keywords: multilayer strip-slot technology, band pass filter, microwave measurements

For citation: Darovskikh S.N., Fomin D.G., Dudarev N.V., Klygach D.S., Vakhitov M.G. Experimental study of band pass filters based on multilayer technology. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(4):48–55. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220405

Введение

В настоящее время известны различные виды полосно-пропускающих СВЧ-фильтров. Они отличаются друг от друга своими массогабаритными характеристиками, конструктивным исполнением, технологией изготовления, а также удобством настройки и регулировки основных электрических параметров. Широко известны своим применением на практике следующие виды полосовых фильтров: волноводные фильтры [1], полосковые/микроросовые фильтры [2–6], фильтры на сосредоточенных элементах [7] и др. [8–10]. Одним из перспективных направлений конструирования полосовых фильтров является применение многослойной полосково-щелевой технологии, основанной на соблюдении трех основных принципов: принцип бесконтактной электромагнитной связи, принцип многослойности, принцип модульности построения [11–14]. Настоящее исследование является логическим продолжением работы [14], в которой представлено теоретическое исследование полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной полосково-щелевой технологии, в том числе при одно-, двух- и трехмодовом режимах «возбуждения»

щелевого резонатора в составе их конструкции. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной полосково-щелевой технологии.

1. Методы исследования

В рамках настоящего исследования проведено компьютерное моделирование в программе электродинамического моделирования, где были подобраны основные геометрические размеры элементов топологии фильтров и предварительно исследованы их амплитудно-частотные характеристики. Исследования выполнены при использовании суперкомпьютерных ресурсов Южно-Уральского государственного университета [15]. По результатам компьютерного моделирования были изготовлены макеты фильтров с применением отечественных СВЧ-материалов, таких как ФАФ-4Д, и проведено их экспериментальное исследование при использовании векторного анализатора цепей. В настоящей работе были исследованы три типа конструкции полосно-пропускающих фильтров (ППФ): 1 – с режимом «возбуждения» первой (основной) моды щелевого резонатора, 2 – с режимом «возбуждения» первой и второй мод щелевого резонатора, 3 – с режимом «возбуждения» первой, второй и третьей мод щелевого резонатора. При этом основная мода щелевого резонатора в составе конструкции ППФ № 1 соответствовала частоте – 1000 МГц, в составе конструкции ППФ № 2 – 660 МГц, в составе конструкции ППФ № 3 – 500 МГц. Центральная частота во всех случаях – 1000 МГц. Основные размеры для каждой исследуемой конструкции приведены в табл. 1.

Параметры основных элементов конструкций ППФ

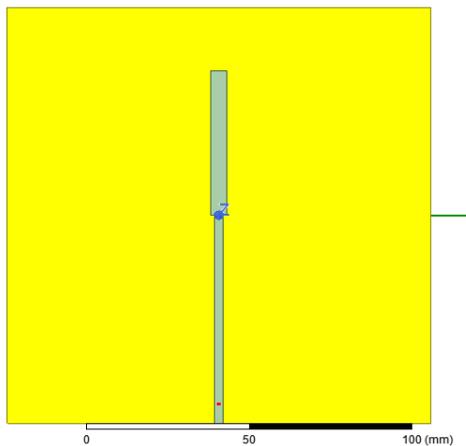
Таблица 1

Parameters of the main elements of BPFs designs

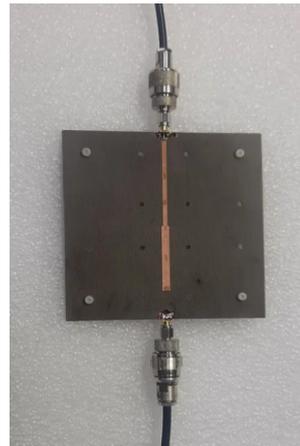
Table 1

Параметр	Конструкция ППФ № 1	Конструкция ППФ № 2	Конструкция ППФ № 3
Параметры подложки	Материал ФАФ-4Д, толщина 1 мм, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 2,5$, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta = 0,018$		
Размер диэлектрического основания, мм	130 × 130	200 × 120	220 × 140
Длина полоскового резонатора, мм / электрическая длина на центральной частоте, °	45 / 79,6	49 / 86,7	50 / 88,4
Ширина полоскового резонатора, мм / волновое сопротивление, Ом	5 / 33,5		
Длина щелевого резонатора, мм / электрическая длина на частоте основной моды щелевого резонатора, °	102 / 180,5	160 / 186,9	205 / 181,4
Ширина щелевого резонатора, мм / волновое сопротивление, Ом	0,3 / 55		

Компьютерные модели исследуемых конструкций ППФ, используемые при компьютерном моделировании, а также макеты, изготовленные на их основе, приведены на рис. 1–3.



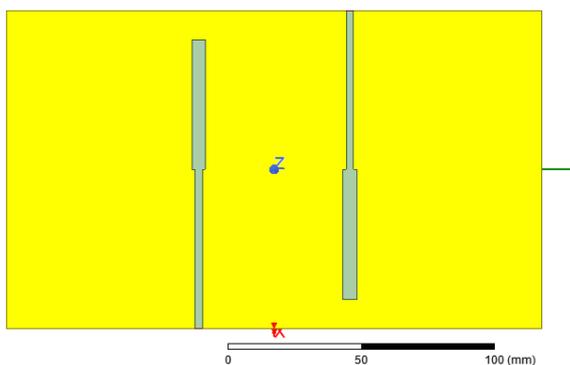
a)



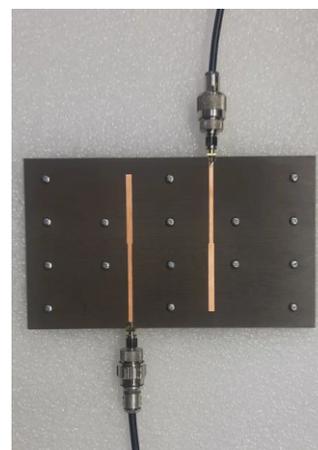
b)

Рис. 1. Конструкция ППФ № 1: а – компьютерная модель в программе электродинамического моделирования; б – макет

Fig. 1. Design of BPF No. 1: a – the computer model in electrodynamic simulation program; b – the layout



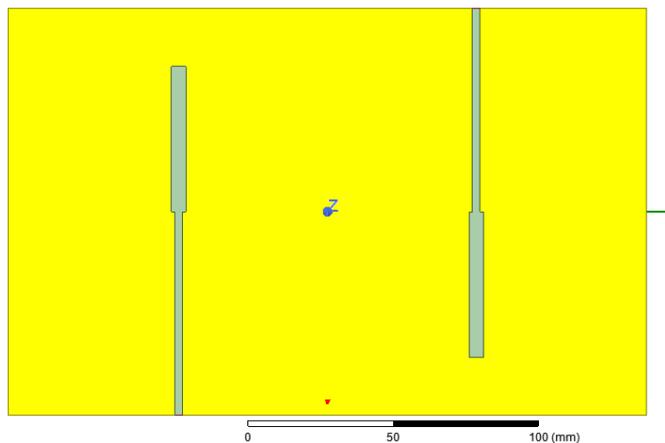
a)



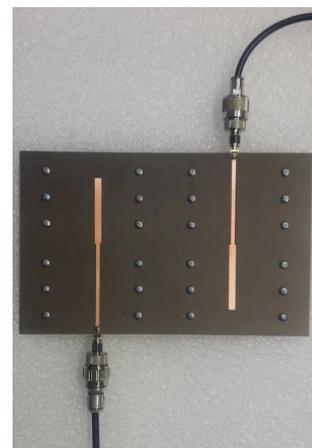
b)

Рис. 2. Конструкция ППФ № 2: а – компьютерная модель в программе электродинамического моделирования; б – макет

Fig. 2. Design of BPF No. 2: a – the computer model in electrodynamic simulation program; b – the layout



a)



b)

Рис. 3. Конструкция ППФ № 3: а – компьютерная модель в программе электродинамического моделирования; б – макет

Fig. 3. Design of BPF No. 3: a – the computer model in electrodynamic simulation program; b – the layout

2. Результаты

Результаты теоретического и экспериментального исследований электрических характеристик рассматриваемых конструкций ППФ приведены на рис. 4–6, а также в табл. 2.

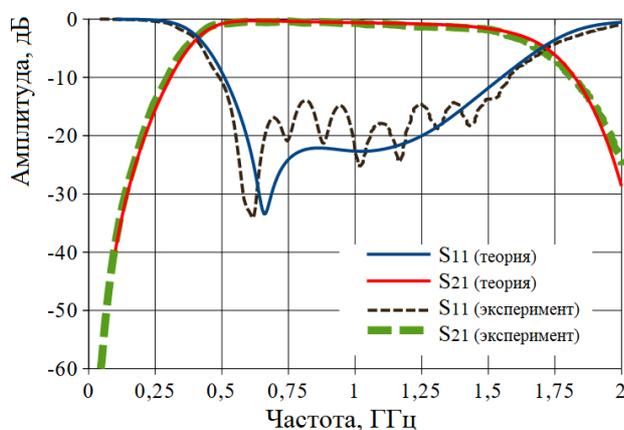


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения (S11) и коэффициента передачи (S21) для конструкции ППФ № 1 в диапазоне частот до 2 ГГц
Fig. 4. Dependencies of the reflection coefficient (S11) and transmission coefficient (S21) for the BPF design No. 1 in the frequency range up to 2 GHz

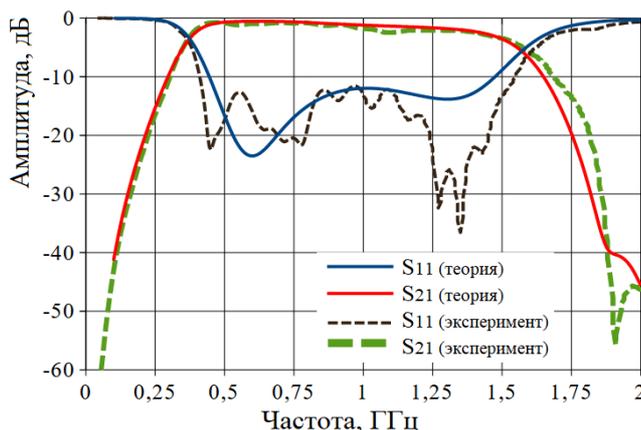


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения (S11) и коэффициента передачи (S21) для конструкции ППФ № 2 в диапазоне частот до 2 ГГц
Fig. 5. Dependencies of the reflection coefficient (S11) and transmission coefficient (S21) for the BPF design No. 2 in the frequency range up to 2 GHz

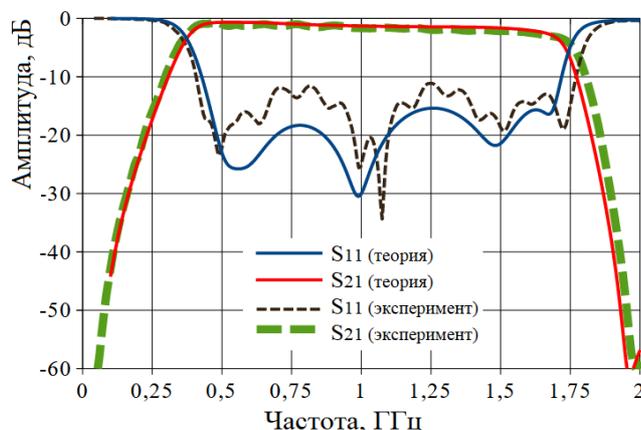


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения (S11) и коэффициента передачи (S21) для конструкции ППФ № 3 в диапазоне частот до 2 ГГц
Fig. 6. Dependencies of the reflection coefficient (S11) and transmission coefficient (S21) for the BPF design No. 3 in the frequency range up to 2 GHz

Таблица 2

Результаты исследований

Table 2

Research results

Параметр	Конструкция ППФ № 1	Конструкция ППФ № 2	Конструкция ППФ № 3
Полоса пропускания по уровню -3 дБ, ГГц (теория/эксперимент)	(0,41–1,63)/ (0,4–1,6)	(0,38–1,48)/ (0,37–1,48)	(0,38–1,69)/ (0,37–1,69)
Затухание на центральной частоте, дБ (теория/эксперимент)	0,62 / 0,68	1,08 / 1,61	1,25 / 1,5
Полоса пропускания по уровню КСВН $\leq 1,9$, ГГц (теория/эксперимент)	(0,51–1,55)/ (0,49–1,58)	(0,44–1,47)/ (0,41–1,54)	(0,43–1,72)/ (0,41–1,77)

Из представленных графических зависимостей и табличных данных следует, что теоретические результаты, полученные с помощью компьютерного моделирования, а также данные экспериментальных исследований находятся в хорошем качественном и количественном согласовании. Отклонение коэффициента передачи на центральной частоте составляет не более 0,53 дБ; отклонение границы полосы пропускания составляет не более 30 МГц (3 % относительно центральной частоты). Отклонение границы полосы пропускания по уровню КСВН менее 1,9 составляет не более 70 МГц (7,2 % относительно центральной частоты). Это связано с наличием дополнительных потерь на коаксиальных кабелях, используемых при экспериментальных исследованиях. Наличие дополнительных потерь уменьшает уровень отраженной мощности и приводит к улучшению КСВН.

Заключение

В работе представлены теоретическое и экспериментальное исследования полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной полосково-щелевой технологии, реализованных на отечественном СВЧ-материале ФАФ-4Д. Теоретические результаты получены при использовании программы численного электродинамического моделирования. Экспериментальные результаты получены на макетах исследуемых полосно-пропускающих фильтров при использовании векторного анализатора цепей. По результатам исследований получены частотные зависимости S-параметров исследуемых фильтров, которые находятся в хорошем качественном и количественном согласовании. Таким образом, возможность «возбуждения» многомодового режима щелевого резонатора в составе многослойных конструкций полосно-пропускающих фильтров экспериментально подтверждена.

Список литературы

1. Комаров В.В., Лукьянов М.А. Волноводные СВЧ-фильтры: технические решения, тенденции развития и методы расчёта. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. № 1. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.1.9
2. Kikkert C.J. A design technique for microstrip filters, Signal Processing and Communication Systems // 2008 2nd International Conference on Signal Processing and Communication Systems. 2008. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICSPCS.2008.4813713
3. Летавин Д.А. Способ миниатюризации микрополоскового двухшлейфного моста // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2017. № 5. С. 41–46.
4. Letavin D.A., Alaev D.P. A compact 3-dB coupler with stubs // Journal of Physics: Conference Series. IC-MSQUARE 2020. 2021. Vol. 1730, no. 1. P. 012104. DOI: 10.1088/1742-6596/1730/1/012104
5. Letavin D.A., Terebov I.A. Investigation of a Broadband Five-Stub 3 dB Coupler Using Microstrip Cells // 2020 IEEE East-West Design and Test Symposium. EWDTTS 2020. September 2020. DOI: 10.1109/EWDTTS50664.2020.9224938
6. Chinig A. A Design of Microstrip Diplexer based on Modified Stepped Impedance Resonators // Mediterranean Telecommunications Journal. Jan. 2018. Vol. 8, no. 1. P. 1–7.
7. Zukocinski M., Gołaszewski A.Z., Abramowicz A. Shaping frequency characteristics of

wideband direct-coupled resonator filters by means of electric and magnetic couplings // 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communication (MIKON). 2014. DOI: 10.1109/MIKON.2014.6899835

8. Pozar D.M. *Microwave Engineering*. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2011. 732 p.

9. Matthaei G., Young L., Jones E.M.T. *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*. New York: McGraw Hill Book Company, 1971.

10. Cameron R.J., Kudsia C.M., Mansour R.R. *Microwave filters for communication systems*. New York: Wiley. 2007. 772 p.

11. Особенности применения объемно-модульной технологии в проектировании СВЧ электронных устройств / Д.Г. Фомин, Н.В. Дударев, С.Н. Даровских и др. // *Ural Radio Engineering Journal*. 2021. Vol. 5 (2). P. 91–103. DOI: 10.15826/urej.2021.5.2.001

12. The Volume-Modular Technology in the Design of Passive Microwave Devices / N.V. Dudarev, D.G. Fomin, S.N. Darovskikh et al. // 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2021. 2021. P. 225–227. DOI: 10.1109/USBEREIT51232.2021.9455051

13. Analysis and design of wideband microstrip-to-microstrip equal ripple vertical transitions and their application to bandpass filters / L. Yang, L. Zhu, W.-W. Choi, K.-W. Tam // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017. Vol. 65. P. 2866–2877. DOI: 10.1109/TMTT.2017.2675418

14. Моделирование полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной технологии / Д.Г. Фомин, С.Н. Даровских, Н.В. Дударев и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2022. Т. 22, № 1. С. 77–87. DOI: 10.14529/ctcr220106

15. Kostenetskiy P., Semenikhina P. SUSU Supercomputer Resources for Industry and fundamental Science // 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, 13–15 November 2018. Chelyabinsk, 2018. P. 1–7. 10.1109/GloSIC.2018.8570068

References

1. Komarov V.V., Lukyanov M.A. [Waveguide microwave filters technical solutions, development trends and calculation methods]. *Journal of Radio Electronics*. 2021;(1). (In Russ.) DOI: 10.30898/1684-1719.2021.1.9

2. Kikkert C.J. A design technique for microstrip filters, *Signal Processing and Communication Systems*. In: *2008 2nd International Conference on Signal Processing and Communication Systems*. 2008. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICSPCS.2008.4813713

3. Letavin D.A. The method of miniaturization of a microstrip branch-line couplers. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics = Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika*. 2017;(5):41–46. (In Russ.)

4. Letavin D.A., Alaev D.P. A compact 3-dB coupler with stubs. *Journal of Physics: Conference Series. IC-MSQUARE 2020*. 2021;1730(1):012104. DOI: 10.1088/1742-6596/1730/1/012104

5. Letavin D.A., Terebov I.A. Investigation of a Broadband Five-Stub 3 dB Coupler Using Microstrip Cells. In: *2020 IEEE East-West Design and Test Symposium. EWDTTS 2020*. September 2020. DOI: 10.1109/EWDTTS50664.2020.9224938

6. Ching A. A Design of Microstrip Diplexer based on Modified Stepped Impedance Resonators. *Mediterranean Telecommunications Journal*. Jan. 2018;8(1):1–7.

7. Zukocinski M., Gołaszewski A.Z., Abramowicz A. Shaping frequency characteristics of wideband direct-coupled resonator filters by means of electric and magnetic couplings. In: *20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communication (MIKON)*. 2014. DOI: 10.1109/MIKON.2014.6899835

8. Pozar D.M. *Microwave Engineering*. 4th ed. Hoboken: Wiley; 2011. 732 p.

9. Matthaei G., Young L., Jones E.M.T. *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*. New York: McGraw Hill Book Company; 1971.

10. Cameron R.J., Kudsia C.M., Mansour R.R. *Microwave filters for communication systems*. New York: Wiley; 2007. 772 p.

11. Fomin D.G., Dudarev N.V., Darovskikh S.N., Klygach D.S., Vakhitov M.G. Specific features of volume-modular technology application in the design of microwave electronic devices. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(2):91–103. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2021.5.2.001

12. Dudarev N.V., Fomin D.G., Darovskikh S.N., Klygach D.S., Vakhitov M.G. The Volume-Modular Technology in the Design of Passive Microwave Devices. In: *2021 Ural Symposium on Bio-medical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2021*; 2021. P. 225–227. DOI: 10.1109/USBEREIT51232.2021.9455051

13. Yang L., Zhu L., Choi W.-W., Tam K.-W. Analysis and design of wideband microstrip-to-microstrip equal ripple vertical transitions and their application to bandpass filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017;65:2866–2877. DOI: 10.1109/TMTT.2017.2675418

14. Fomin D.G., Darovskikh S.N., Dudarev N.V., Prokopov I.I., Dudarev S.V. Simulation of band pass filters based on multilayer technology. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(1):77–87. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220106

15. Kostenetskiy P., Semenikhina P. SUSU Supercomputer Resources for Industry and fundamental Science. In: *2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, 13–15 November 2018*. Chelyabinsk; 2018. P. 1–7. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570068

Информация об авторах

Даровских Станислав Никифорович, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; darovskikhsn@susu.ru.

Фомин Дмитрий Геннадьевич, младший научный сотрудник кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; fomindg@susu.ru.

Дударев Николай Валерьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных технологий, и. о. заведующего кафедрой инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; dudarevnn@susu.ru.

Клыгач Денис Сергеевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доц. кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; klygachds@susu.ru.

Вахитов Максим Григорьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доц. кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; vakhitovmg@susu.ru.

Information about the authors

Stanislav N. Darovskikh, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Prof. of the Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; darovskikhsn@susu.ru.

Dmitriy G. Fomin, Junior Researcher of the Department of Infocommunication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; fomindg@susu.ru.

Nikolay V. Dudarev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Senior Lecturer of the Department of Information and Communication Technologies, Acting Head of the Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; dudarevnn@susu.ru.

Denis S. Klygach, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Ass. Prof. of the Department of Design and Manufacture of Radio Equipment, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; klygachds@susu.ru.

Maksim G. Vakhitov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Ass. Prof. of the Department of Design and Manufacture of Radio Equipment, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; vakhitovmg@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 05.07.2022

The article was submitted 05.07.2022

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы Instrument engineering, metrology and information and measuring devices and systems

Научная статья
УДК 681.322
DOI: 10.14529/ctcr220406

МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВХОДНОГО СИГНАЛА В ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ С ИСКЛЮЧЕНИЕМ КОРРЕКТИРУЮЩИХ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ

Д.Д. Япаров, iaparovdd@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9106-2773>
А.Л. Шестаков, a.l.shestakov@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Проблема обработки данных, полученных при динамических измерениях, – одна из центральных проблем в измерительной технике. **Цель исследования.** Статья посвящена модели измерительной системы и методу обработки результатов динамических измерений. Поэтому актуальной задачей является разработка алгоритмами обработки результатов динамических измерений. **Материалы и методы.** В этой статье предлагается модель измерительной системы без обратных связей и метод обработки данных, полученных при динамических измерениях на основе конечно-разностного подхода. Основные предпосылки математической модели задачи динамических измерений, связанной с процессами восстановления входного сигнала в условиях неполных и зашумленных исходных данных, заключаются в следующем. Изначально известна функция зашумленного выходного сигнала. Восстановление входного сигнала осуществляется с помощью передаточной функции датчика. Передаточная функция датчика представлена в виде дифференциального уравнения. Это уравнение описывает состояние динамической системы в реальном времени. Предлагаемая вычислительная схема метода основана на конечно-разностных аналогах производных. На основе саморегуляризирующего подхода была построена численная модель датчика. Проблема устойчивости метода решения дифференциальных уравнений высокого порядка также является одной из центральных проблем обработки данных в системах автоматического управления. Был получен необходимый уровень точности благодаря обобщенному квазиоптимальному подходу к выбору параметра регуляризации. **Полученные результаты.** Основной целью вычислительного эксперимента было построение численного решения рассматриваемой задачи. Стандартные тестовые функции рассматривались как входные сигналы. В качестве входного сигнала подавался тестовый сигнал, моделирующий физический процесс. Была найдена функция выходного сигнала с помощью предложенного численного метода, найденная функция была зашумлена аддитивным шумом в 5 %. **Заключение.** По зашумленному сигналу был восстановлен входной сигнал. Отклонение восстановленного сигнала от исходного во всех экспериментах составило не более 0,05, что говорит об устойчивости данного метода относительно зашумленных данных и возможности использования данного подхода в динамических измерениях.

Ключевые слова: динамические измерения, конечно-разностная схема, методы регуляризации, передаточная функция, алгоритмы обработки данных динамических измерений, измерительные системы, численный метод

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Челябинской области в рамках регионального гранта № 20-48-740022 «Методы регуляризации при обработке зашумленных данных в многоканальных измерительных системах».

Для цитирования: Япаров Д.Д., Шестаков А.Л. Метод восстановления входного сигнала в динамических системах на основе дискретной модели с исключением корректирующих обратных связей // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 56–66. DOI: 10.14529/ctcr220406

**METHOD FOR RECOVERY OF THE INPUT SIGNAL
IN DYNAMIC SYSTEMS BASED ON A DISCRETE MODEL
WITH THE EXCLUSION OF CORRECTING FEEDBACKS***D.D. Yaparov*, iaparovdd@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9106-2773>*A.L. Shestakov*, a.l.shestakov@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Abstract. The problem of processing data obtained during dynamic measurements is one of the central problems in measuring technology. **Purpose of the study.** The article is devoted to the model of the measuring system and the method of processing the results of dynamic measurements. Therefore, an urgent task is to develop algorithms for processing the results of dynamic measurements. **Materials and methods.** This article proposes a model of a measuring system without feedback and a method for processing data obtained from dynamic measurements based on a finite difference approach. The main prerequisites of the mathematical model of the problem of dynamic measurements associated with the processes of restoration of the input signal under conditions of incomplete and noisy initial data are as follows. Initially, the function of the noisy output signal is known. Restoration of the input signal is carried out using the transfer function of the sensor. The transfer function of the sensor is presented as a differential equation. This equation describes the state of a dynamic system in real time. The proposed computational scheme of the method is based on the finite-difference analogues of derivatives and the self-regularizing approach was built a numerical model of the sensor. The problem of the stability of the method for solving high-order differential equations is also one of the central problems of data processing in automatic control systems. Based on the approach of generalized quasi-optimal choice of the regularization parameter, the required level of accuracy was achieved. **Results.** The main goal of the computational experiment was to construct a numerical solution of the problem under consideration. Standard test functions were considered as input signals. As an input signal, a test signal was applied, simulating a physical process. The function of the output signal was found using the proposed numerical method, the found function was noisy with an additive noise of 5%. **Conclusion.** The input signal was restored from the noisy signal. The deviation of the reconstructed signal from the original in all experiments was no more than 0.05, which indicates the stability of this method with respect to noisy data and the possibility of using this approach in dynamic measurements.

Keywords: dynamic measurements, finite difference scheme, regularization methods, transmission function, dynamic measurement data processing algorithms, measuring systems, numerical method

Acknowledgments: The study was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Chelyabinsk Region within the framework of a regional grant No. 20-48-740022 "Regularization methods for processing noisy in multichannel measuring systems".

For citation: Yaparov D.D., Shestakov A.L. Method for recovery of the input signal in dynamic systems based on a discrete model with the exclusion of correcting feedbacks. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(4):56–66. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220406

Введение

Эффективность управления технологическими процессами напрямую связана с обеспечением оптимальности параметров системы. Точность контроля и оптимизация параметров зависят от точности обработки данных о состоянии системы. В быстропротекающих энергоёмких технологических процессах состояние системы изменяется в течение короткого промежутка времени, и в силу инерционности измерительной системы средства измерений показывают на выходе искажённый сигнал, существенно отличающийся от истинного. Другим фактором, оказывающим существенное влияние на точность обработки данных, является зашумленность данных о состоянии системы, сформированных из результатов измерений. Проблема зашумленности в сочетании с инерционностью измерительной системы становится особенно острой для динамических измерений, выполненных в малый промежуток времени, когда даже небольшой шум в исходных данных приводит к существенному искажению результатов их обработки.

Проблеме обработки зашумленных динамических сигналов посвящены работы многих исследователей, когда для уменьшения влияния погрешности исходных данных на конечный результат добавляют дополнительные фильтры. Среди работ, посвященных этой области исследования, отметим работы А.Л. Шестакова [1–3], В.А. Бесекерского [4], А.Ф. Верлань [5], В.А. Грановского [6, 7], Г.Н. Солопченко [8–10], S. Engelberg [11], К. Ruhm [12, 13]. Введение дополнительных фильтров значительно усложняет методы обработки информации, при этом характеристики фильтров изменяются в зависимости от уровня шума. Решения задачи обработки зашумленных данных с помощью численных методов приводятся в работах [14, 15].

В связи с вышесказанным возникает необходимость создания и совершенствования алгоритмов обработки зашумленных динамических измерений, не требующих значительной перенастройки параметров измерительной системы.

1. Модель измерительной системы

Обработка результатов динамических измерений осуществляется, исходя из модели измерительной системы. Концепция модели предложена в работах [1–3]. Структурная модель для второго порядка представлена на рис. 1, где $U(t)$ – входной сигнал, $Y_\delta(t)$ – выходной сигнал датчика с шумом, $\Delta(t)$ – шум, $Y_S(t)$ – выходной сигнал модели, $U^*(t)$ – восстановленный сигнал.

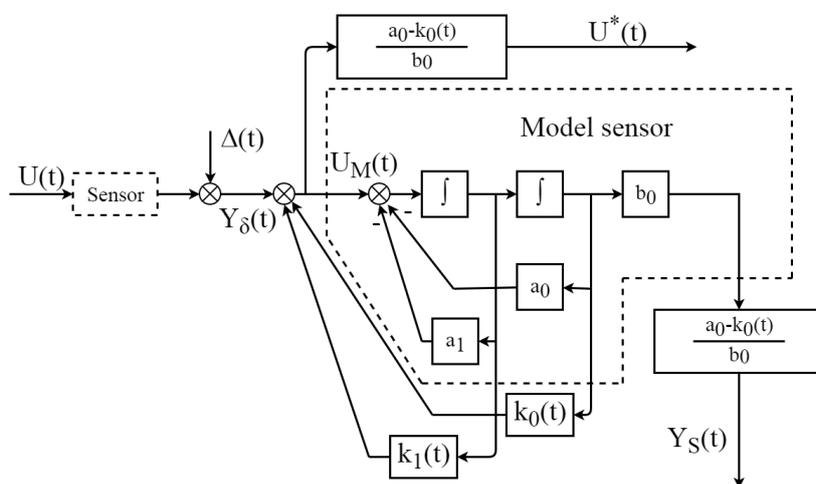


Рис. 1. Структурная модель измерительной системы
 Fig. 1. Structural model of the measuring system

Модель измерительной системы включает в себя модель датчика, выход которого связан с его полной динамической моделью, где моделируется принцип работы датчика с заданными динамическими характеристиками, определенными коэффициентами a_0, a_1, a_2, b_0 .

Пусть t – текущий момент времени, $t \in [0; \Omega]$, где Ω – период измерения; $U(t)$ – входной сигнал; $Y_\delta(t)$ – выходной сигнал датчика с шумом; $Y_S(t)$ – выходной сигнал модели; W – передаточная функция датчика в образах Лапласа.

Согласно [16], динамическая модель, имитирующая принцип работы, охватывается обратными связями с изменяемыми коэффициентами k_0, k_1 . Критерием настройки коэффициентов обратных связей k_0, k_1 служит близость выходных сигналов датчика и его модели. Модель с коэффициентами k_0, k_1 является корректирующими фильтрами для входного и выходного сигналов. В этой модели восстановление входного сигнала осуществляется на основе передаточной функции датчика, имеющей следующее операторное представление, полученное при использовании прямого преобразования Лапласа:

$$W(p) = \frac{b_0}{a_2 p^2 + (a_1 - k_1)p + (a_0 - k_0)} = \frac{U^*(p)}{U(p)}$$

Соответствие модели измерительной системе подтверждается экспериментальными исследованиями, представленными в работе [3].

Отметим, что передаточная функция датчика будет иметь следующий вид:

$$W(p) = \frac{b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0} = \frac{Y(p)}{U(p)} \quad (1)$$

В модели, предложенной в работе [16], уменьшение величины погрешности осуществляется за счет регулирования значений коэффициентов обратной связи k_0, k_1 для обеспечения близости $Y_S(t)$ к $Y_\delta(t)$.

В рамках данной работы предложен метод, позволяющий контролировать погрешность, не используя коэффициенты обратных связей k_0, k_1 , и восстанавливать с требуемой точностью входные сигналы $U(t)$ по выходным сигналам $Y_\delta(t)$ при различных уровнях зашумленности измеренных данных.

2. Метод исключения обратных связей

Полагаем, что измерения проводятся дискретно, с интервалом τ . При построении модели используем следующие обозначения: $U(t)$ – входной сигнал датчика; $Y_M(t)$ – выходной сигнал модели без обратных связей; $U_\delta(t)$ – восстановленный сигнал; a_0, a_1, a_2, b_0 – коэффициенты, определяющие динамические характеристики исходной системы (рис. 2).

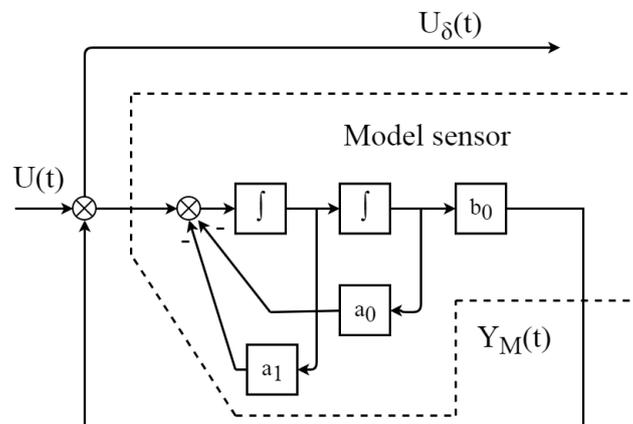


Рис. 2. Модель без обратных связей
Fig. 2. Model without feedback

В данной работе предлагается построить динамическую модель системы, исключая обратные связи, в которой улучшение динамических характеристик системы решается настройкой параметра τ .

Основная идея метода исключения обратных связей заключается в следующем. На первом этапе осуществляют переход от передаточной функции (1) к дифференциальному уравнению, связывающему выходной сигнал $Y_\delta(t)$ с входным сигналом $U(t)$. На втором этапе, используя полученное уравнение, осуществляют переход к конечно-разностному аналогу этого уравнения. На третьем этапе оценивают отклонение $Y_M(t)$ от $Y_S(t)$. В случае, когда оценка отклонения не превышает некоторый заданный уровень точности, процесс исключения обратных связей считается успешным.

Основные этапы исключения обратных связей состоят в следующем.

Этап 1. Построение математической модели связи $Y(t)$ и $U(t)$. Для этого перейдем от передаточной функции (1) к дифференциальному уравнению

$$a_2 Y'' + a_1 Y' + a_0 Y = b_0 U. \quad (2)$$

Учитывая состояние измерительной системы в начальный момент времени, получаем следующие начальные условия:

$$Y(0) = r, Y'(0) = q. \quad (3)$$

В задаче (2), (3) требуется найти функцию $Y(t)$. Специфика задачи (2), (3) заключается в том, что в измерительных системах при использовании общепринятых методов малый уровень шума в системе оказывает существенное влияние на точность восстановления сигнала.

Этап 2. Построение конечно-разностных уравнений и переход к дискретной модели (рис. 3, где $U(t)$ – входной сигнал; $Y_M(t)$ – выходной сигнал модели; $U_\delta(t)$ – восстановленный сигнал; $c_0 = \frac{a_1}{\tau} - \frac{2a_2}{\tau^2}$, $c_1 = a_0 - \frac{a_1}{\tau} + \frac{a_2}{\tau^2}$ – коэффициенты, позволяющие изменять динамические характе-

ристики модели за счет изменения параметра τ и перейти к модели без обратных связей). Для этого введем на отрезке $[0; \Omega]$ сетку G из $(N + 1)$ узлов с шагом дискретизации $\tau = \frac{(\Omega-0)}{N}$:

$$G = \left\{ t_i: t_i = (i - 1)\tau, \tau = \frac{(\Omega-0)}{N}, i = \overline{1, N + 1} \right\}$$

и используем множество дискретных функций $V = \{v(t_i) = v_i\}$, заданных на сетке G . Значения v_i соответствуют значениям функции $Y_M(t_i)$ в момент времени t_i , тогда текущему моменту времени соответствует узел $t_i = (i - 1)\tau, i = \overline{1, N + 1}$.

Используя конечно-разностные аналоги производных в узле t_i :

$$v'(t_i) = \frac{v_{i+1} - v_i}{\tau}, v''(t_i) = \frac{v_{i+2} - 2v_{i+1} + v_i}{\tau^2}, i = \overline{2, N},$$

получаем, что конечно-разностный аналог уравнения (2) в момент времени t_i имеет следующий вид:

$$a_2 \frac{v_{i+2} - 2v_{i+1} + v_i}{\tau^2} + a_1 \frac{v_{i+1} - v_i}{\tau} + a_0 v_i = b_0 u_i, i = \overline{2, N}, \quad (4)$$

а начальные условия приводятся к виду:

$$v_1 = y(0) = r, v_2 = \tau y'(0) + y(0) = q\tau + r.$$

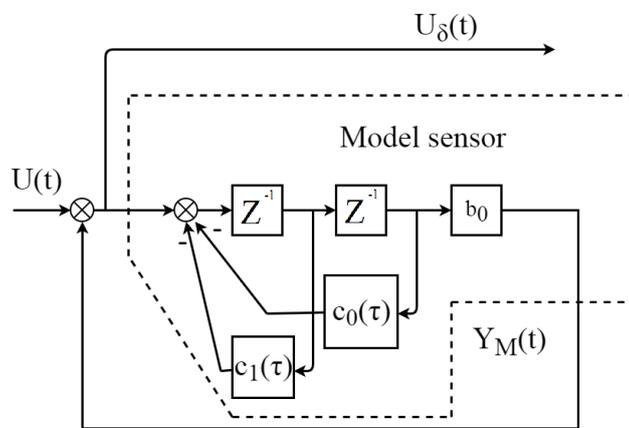


Рис. 3. Дискретная модель без обратных связей
 Fig. 3. Discrete model without feedback

Этап 3. Построение вычислительной схемы моделирования выходного сигнала, добиваясь, чтобы сигнал Y_M предложенной модели (см. рис. 2) был близок к сигналу Y_S модели с корректирующими коэффициентами (см. рис. 1). Для вычисления значения выходного сигнала в момент времени t_{i+2} используем полученные конечно-разностные соотношения. Тогда значения $Y_M(t_{i+1})$ определяются по следующей явной схеме:

$$v_1 = r, v_2 = \tau q + r; \quad (5)$$

$$v_{i+2} = (bu_i - \left(\frac{a_1}{\tau} - \frac{2a_2}{\tau^2}\right)v_{i+1} - \left(a_0 - \frac{a_1}{\tau} + \frac{a_2}{\tau^2}\right)v_i) \frac{\tau^2}{a_2}. \quad (6)$$

Известно, что для обеспечения устойчивости конечно-разностных явных схем относительно шума в исходных данных необходимо использовать регуляризирующие подходы. В предлагаемой явной схеме (5), (6) параметром регуляризации является величина шага дискретизации τ . Такой подход к регуляризации в динамических системах предлагается впервые и позволяет моделировать выходной сигнал, при известных и постоянных параметрах системы a_0, a_1, a_2 в условиях шумов.

3. Метод восстановления входного сигнала

В задаче восстановления входного сигнала начальные условия выглядят следующим образом. Выходной сигнал $y = Y_\delta(t)$ формируется на основе результатов измерений, а величина δ соответствует уровню шума выходного сигнала. Конечно-разностный аналог уравнения (4) относительно u_i имеет вид:

$$(a_2 + a_1\tau)u_{i+1} - (2a_2 + a_1\tau + a_0\tau^2)u_i - a_2u_{i-1}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) находим u_i , соответствующий восстановленному выходному сигналу $U_\delta(t)$. Далее оценивают отклонение $U_\delta(t)$ от входного сигнала модели $U(t)$. В случае, когда оценка от-

клонения не превышает некоторый заданный уровень точности, процесс восстановления сигнала считается успешным.

Верификация результатов работы предлагаемого метода обработки информации осуществлялась в вычислительном эксперименте, проводимом на основе имитационного моделирования. Результаты эксперимента приведены в данной работе.

4. Вычислительный эксперимент

Основной целью вычислительного эксперимента являлась верификация модели без обратных связей путем моделирования функцию $Y_M(t)$ выходного сигнала с помощью уравнений (5), (6), выбирая величину параметра τ . В качестве входного сигнала модели $U(t)$ использовались различные функции. Далее, добавляя к функции $Y_M(t)$ аддитивный шум, сравнивали с $Y_S(t)$. Затем по зашумленному сигналу $Y_M(t)$ восстанавливали входной сигнал $U^*(t)$ с помощью уравнения (7) и оценивали отклонение $U^*(t)$ от $U(t)$.

В данной работе приведены результаты эксперимента для значения параметров модели измерительной системы, представленные в таблице.

Параметры модели
Model parameters

Порядок уравнения	Передаточная функция	Шум	$U(t)$	Параметры
II	$\frac{1}{(T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1)}$	5 %	$\sin(\pi t)$	$T_1 = 0,1;$ $\xi_1 = 0,3$

В эксперименте интервал измерения $[0; \Omega]$ составлял $[0; 1]$. Выбор величины шага дискретизации является основополагающим для обеспечения требуемого уровня точности решения задачи динамического измерения. Для выявления влияния величины шага дискретизации на уровень точности восстановления входного сигнала были проведены вычислительные эксперименты с различным количеством узлов сетки G . На рис. 4 показан смоделированный выходной сигнал $Y_M(t)$ с количеством узлов сетки $N = 1000$.

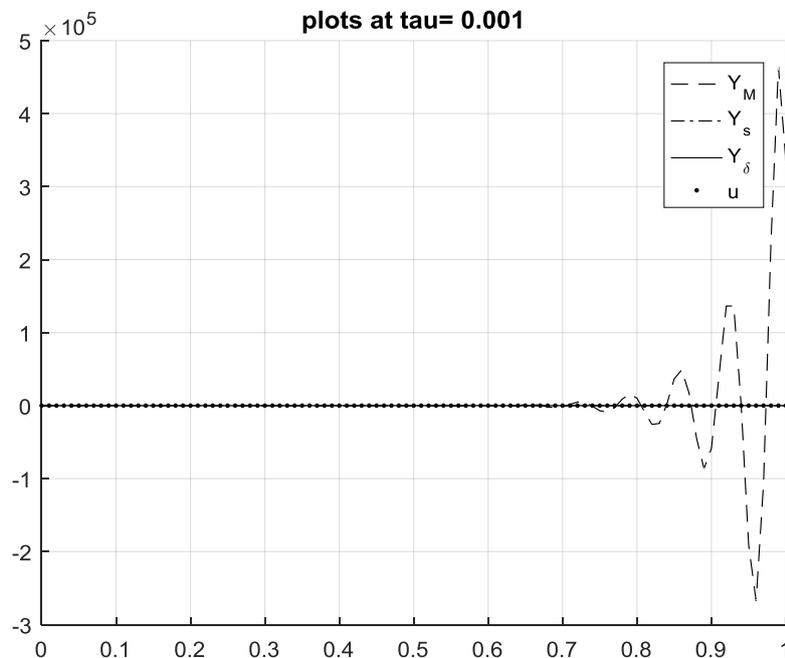


Рис. 4. Результаты моделирования выходного сигнала $Y_M(t)$ при $N = 1000$
Fig. 4. $Y_M(t)$ output signal simulation results at $N = 1000$

Из рис. 4 видно, что при таком количестве узлов сетки, которое определяет параметр τ , процесс восстановления входного сигнала является неустойчивым.

На рис. 5 показан смоделированный выходной сигнал $Y_M(t)$ с количеством узлов сетки $N = 1500$.

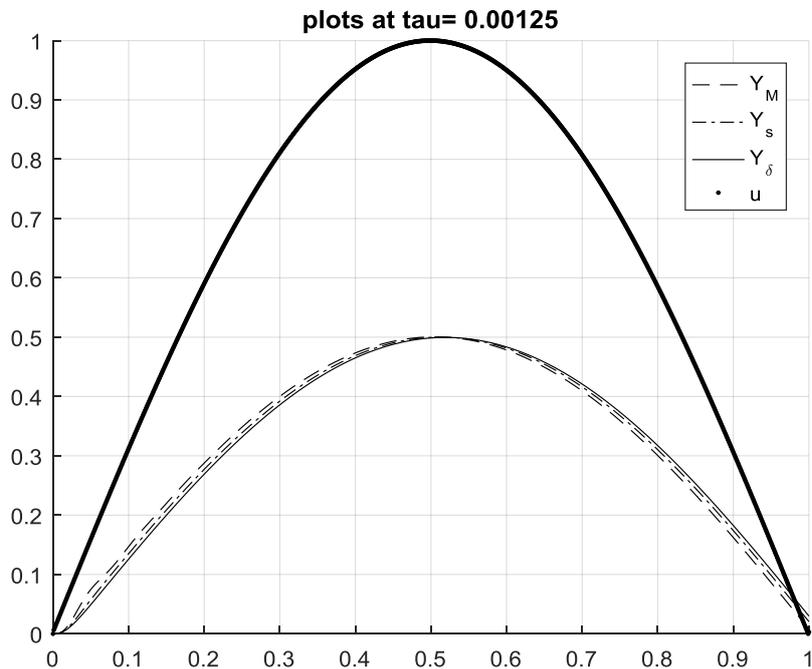


Рис. 5. Результаты моделирования выходного сигнала $Y_M(t)$ при $N = 1500$
Fig. 5. $Y_M(t)$ output signal simulation results at $N = 1500$

На рис. 6 представлена функция выходного сигнала модели без обратных связей $Y_M(t)$ и $Y_S(t)$ с аддитивным шумом 5% при $N = 1500$.

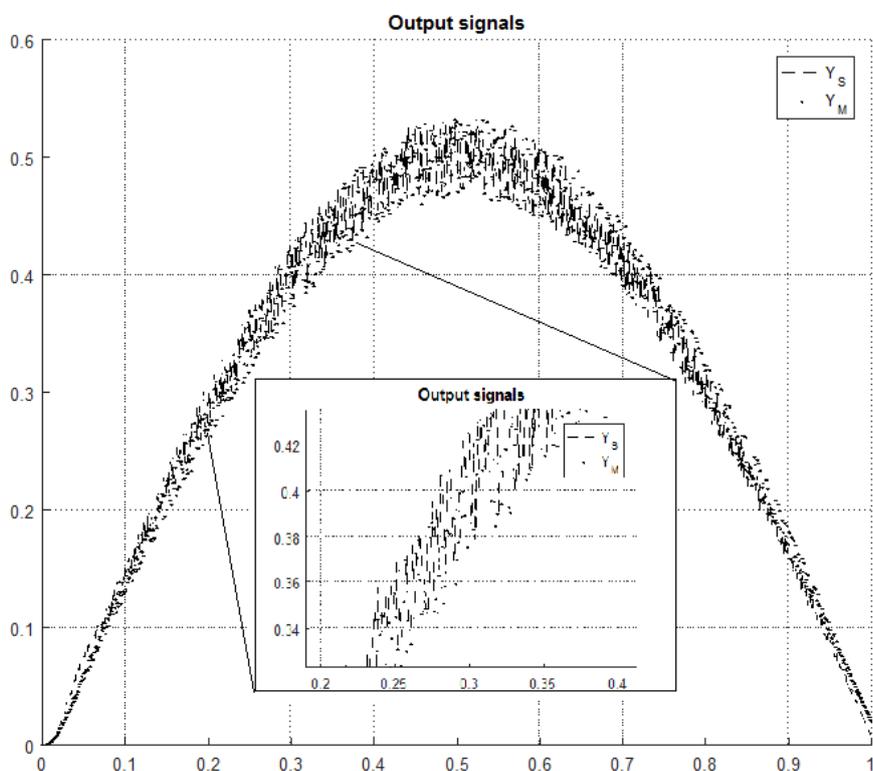


Рис. 6. Функция выходного сигнала $Y_M(t)$ и $Y_S(t)$ с 5%-ным аддитивным шумом
Fig. 6. $Y_M(t)$ and $Y_S(t)$ output function with 5% additive noise

Далее оценивалось отклонение выходных сигналов $Y_M(t)$ и $Y_S(t)$ с 5%-ным аддитивным шумом. Отклонение восстановленного сигнала от исходного не превышала 7% от уровня шума (рис. 7).

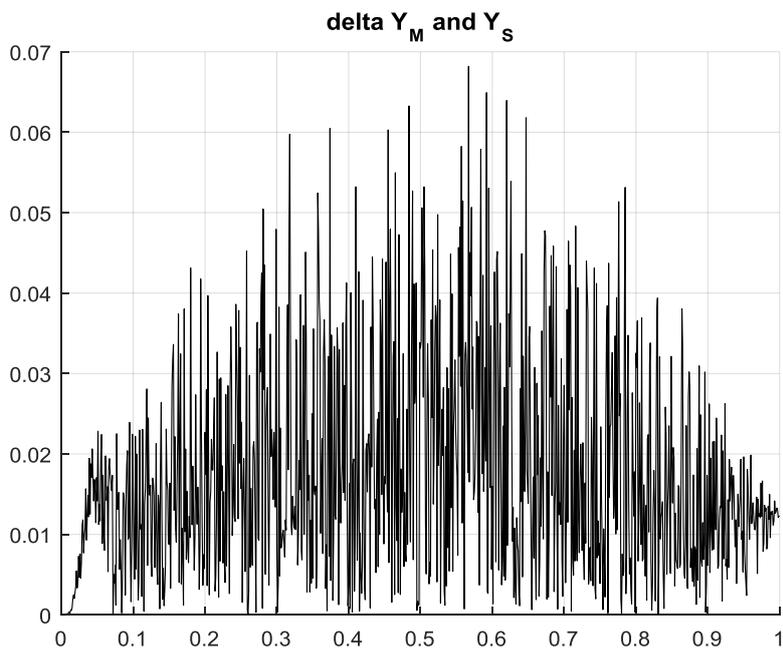


Рис. 7. Функция отклонения выходного сигнала $Y_M(t)$ от $Y_S(t)$.
Оба сигнала с 5%-ным аддитивным шумом
Fig. 7. $Y_M(t)$ output deviation function from $Y_S(t)$.
Both signals have 5% additive noise

Для восстановления входного сигнала $U^*(t)$ к зашумленному выходному сигналу $Y_M(t)$ применялась конечно-разностное уравнение (7). На рис. 8 изображен восстановленный входной сигнал $U^*(t)$.

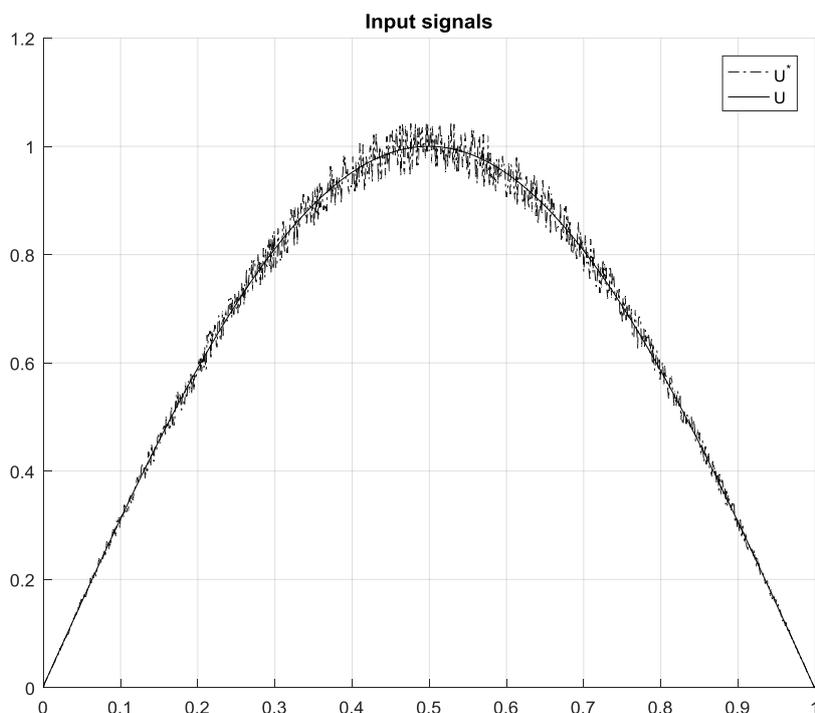


Рис. 8. Функция восстановленного входного сигнала $U^*(t)$ и $U(t)$
Fig. 8. Function of the reconstructed input signal $U^*(t)$ and $U(t)$

Далее оценивалось отклонение восстановленного сигнала от входного сигнала модели $U^*(t)$ от $U(t)$. Отклонение восстановленного сигнала от исходного не превышала 0,05 (рис. 9).

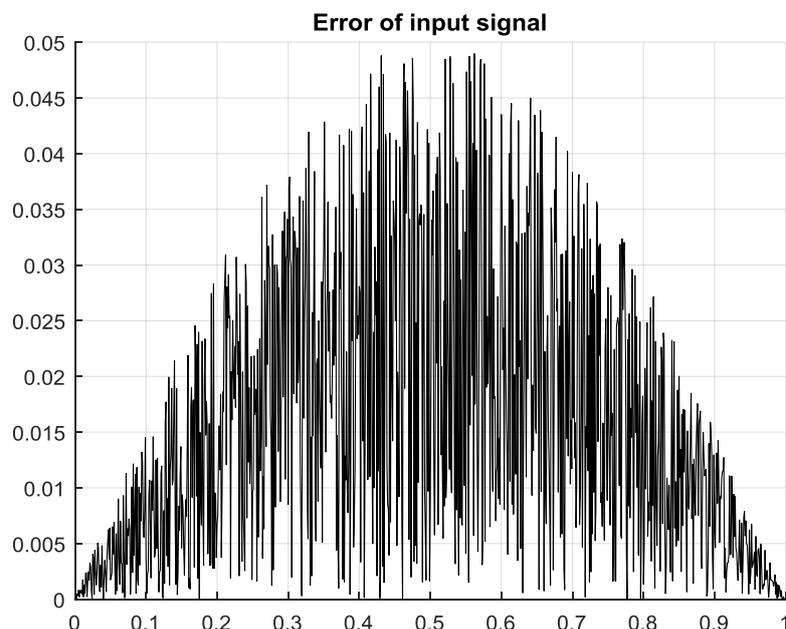


Рис. 9. Функция отклонение восстановленного сигнала $U^*(t)$ от $U(t)$
Fig. 9. Function deviation of the recovered signal $U^*(t)$ from $U(t)$

Результаты имитационного моделирования свидетельствуют о следующем. Метод восстановления входного сигнала, предложенный в работе, позволяет восстанавливать входной сигнал с достаточным уровнем точности по зашумленному выходному сигналу. Экспериментальные оценки погрешности полученных решений свидетельствуют о достаточной устойчивости метода относительно погрешности исходных данных

Заключение

В статье предложены метод исключения обратных связей и метод восстановления входного сигнала по зашумленным данным, основанные на использовании теории систем автоматического управления и теории регуляризации.

Основная идея методов заключается в том, что для уменьшения влияния шума исходных данных на результаты восстановления входного сигнала используется регуляризирующий алгоритм. На основе перехода к дискретной модели системы предложенного метода были проведены вычислительные эксперименты и выполнен сравнительный анализ результатов восстановления входного сигнала с тестовыми функциями. Результаты эксперимента свидетельствуют о возможности использования регуляризирующего алгоритма для задач динамических измерений, обеспечивающего достаточный уровень точности восстановления входного сигнала относительно различных уровней шума исходных данных.

Список литературы

1. Шестаков А.Л. Методы теории автоматического управления в динамических измерениях. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2013. 257 с.
2. Шестаков А.Л., Волосников А.С. Нейросетевая динамическая модель измерительной системы с фильтрацией восстанавливаемого сигнала // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2006. Вып. 4, № 14 (69). С. 16–20.
3. Шестаков А.Л., Свиридюк Г.А. Новый подход к измерению динамически искаженных сигналов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». 2010, Вып. 5, № 16. С. 116–120.
4. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. М.: Наука, 1975. 768 с.

5. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Методы решения интегральных уравнений с программами для ЭВМ. Киев: Наукова думка, 1978. 291 с.
6. Грановский В.А., Этингер Ю.С. Методика определения динамических свойств средств измерений // Метрология. 1974. № 10. С. 9–12.
7. Грановский В.А. Динамические измерения. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 224 с.
8. Солопченко Г.Н. Определение параметров дробно-рациональной передаточной функции средств измерений по экспериментальным данным // Метрология. 1978. № 5. С. 20–24.
9. Солопченко Г.Н., Челпанов И.Б. Компенсация динамических погрешностей при неполных сведениях о свойствах приборов и измеряемых сигналов // Метрология. 1979. № 6. С. 3–13.
10. Солопченко Г.Н. Обратные задачи в измерительных процедурах // Измерения, контроль, автоматизация. 1983. № 2. С. 32–46.
11. Engelberg S. Tutorial 15: control theory, part I // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. June 2008. Vol. 11, no. 3. P. 34–40. DOI: 10.1109/MIM.2008.4534376
12. Ruhm K. Measurement plus observation – A new structure in metrology // Measurement. 2017. Vol. 126. P. 421–432. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.03.040
13. Ruhm K. Dynamics and stability – A proposal for related terms in Metrology from a mathematical point of view // Measurement. 2016. Vol. 79. P. 276–284. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.07.026
14. Лаврентьев М.М., Романов В.Г., Шишатский С.П. Некорректные задачи математической физики и анализа. М.: Наука, 1980. 285 с.
15. Япарова Н.М. Численное моделирование решений обратной граничной задачи теплопроводности // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». 2013. Т. 6, № 3. С. 112–124.
16. А. с. 1571514 СССР, МПК G01P15/08. Измерительный преобразователь динамических параметров / А.Л. Шестаков; заявитель Челяб. политехн. ин-т им. Ленин. комсомола. № 4386153/24-10; заявл. 01.03.1988; опубл. 15.06.90. Бюл. № 22. 3 с.

References

1. Shestakov A.L. *Metody teorii avtomaticheskogo upravleniya v dinamicheskikh izmereniyakh* [Methods of the theory of automatic control in dynamic measurements]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2013. 257 p. (In Russ.)
2. Shestakov A.L., Volosnikov A.S. [Neural network dynamic model of a measuring system with filtering of the recovered signal]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2006; 4(14):16–20. (In Russ.)
3. Shestakov A.L., Sviridyuk G.A. A new approach to measurement of dynamically perturbed signals. *Bulletin of the South Ural state university. Ser. Mathematical modelling, programming & computer software*. 2010;5(16):116–120. (In Russ.)
4. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control systems]. Moscow: Nauka; 1975. 768 p. (In Russ.)
5. Verlan' A.F., Sizikov B.C. *Metody resheniya integral'nykh uravneniy s program-mami dlya EVM* [Methods for solving integral equations with computer programs]. Kyiv: Naukova dumka; 1978. 291 p. (In Russ.)
6. Granovskiy V.A., Etinger Yu.S. [Method for determining the dynamic properties of measuring instruments]. *Metrology*. 1974;(10):9–12. (In Russ.)
7. Granovskiy V.A. *Dinamicheskiye izmereniya* [Dynamic Measurements]. Leningrad: Energoatomizdat; 1984. 224 p. (In Russ.)
8. Solopchenko G.N. [Determination of the parameters of the fractional-rational transfer function of measuring instruments according to experimental data]. *Metrology*. 1978;(5):20–24. (In Russ.)
9. Solopchenko G.N., Chelpanov I.B. [Compensation of dynamic errors with incomplete information about the properties of devices and measured signals]. *Metrology*. 1979;(6):3–13. (In Russ.)
10. Solopchenko G.N. [Inverse problems in measuring procedures]. *Measurements, control, automation*. 1983;(2):32–46. (In Russ.)
11. Engelberg S. Tutorial 15: control theory, part I. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. June 2008;11(3):34–40. DOI: 10.1109/MIM.2008.4534376

12. Ruhm K. Measurement plus observation – A new structure in metrology. *Measurement*. 2017;126:421–432. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.03.040
13. Ruhm K. Dynamics and stability – A proposal for related terms in Metrology from a mathematical point of view. *Measurement*. 2016;79:276–284. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.07.026
14. Lavrent'yev M.M., Romanov V.G., Shishatskiy S.P. *Nekorrektnyye zadachi matematicheskoy fiziki i analiza* [Ill-posed problems of mathematical physics and analysis]. Moscow: Nauka; 1980. 285 p. (In Russ.)
15. Yaparova N.M. Numerical simulation for solving an inverse boundary heat conduction problem. *Bulletin of the South Ural state university. Ser. Mathematical modelling, programming & computer software*. 2013;6(3):112–124. (In Russ.)
16. Shestakov A.L. *Izmeritel'nyy preobrazovatel' dinamicheskikh parametrov* [Measuring transducer of dynamic parameters]. Patent USSR, no. 1571514, 1990. (In Russ.)

Информация об авторах

Япаров Дмитрий Данилович, аспирант кафедры математического обеспечения информационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; iaparovdd@susu.ru.

Шестаков Александр Леонидович, д-р техн. наук, профессор, президент, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; a.l.shestakov@susu.ru.

Information about the authors

Dmitriy D. Yaparov, Postgraduate Student of the Department of Mathematical Foundation of Information Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; iaparovdd@susu.ru.

Alexander L. Shestakov, Dr. Sciences, Professor, President, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; a.l.shestakov@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 15.07.2022
The article was submitted 15.07.2022

РЕАЛИЗАЦИЯ ВИРТУАЛЬНОГО ОСЦИЛЛОГРАФА НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА STM32

В.М. Дмитриев, dmitriewvm@gmail.com

Л.А. Гембух, lev.gembuh@mail.ru

А.Е. Сахабутдинов, ale.xander.s@yandex.ru

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, Россия*

Аннотация. В статье представлены структурно-функциональная схема виртуального осциллографа, описание макетной платы, описание блока «COM-порт». Представлены режимы работы аналого-цифрового преобразователя и UART в микроконтроллере STM32. Из представленных режимов работы выбраны оптимальные для работы блока виртуального осциллографа. **Цель исследования:** разработать виртуальный осциллограф на основе микроконтроллера STM32, предложив его структурно-функциональную схему. **Материалы и методы.** Для разработки структуры виртуального осциллографа необходимо спроектировать схему его взаимодействия с лабораторной установкой, выбрать оптимальный метод для снятия напряжений с точек макетной платы и способ их передачи на компьютер. Также необходимо реализовать блок COM-порта и его взаимодействие с блоком виртуального осциллографа в среде моделирования. **Результаты.** Разработана структурно-функциональная схема программно-аппаратной реализации работы виртуального осциллографа. Описаны режимы работы аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера STM32. Описаны режимы передачи данных по UART в STM32. Представлен формат передаваемых по UART кадров. Также реализован блок COM-порта и его взаимодействие с блоком виртуального осциллографа в среде моделирования MAPS. **Заключение.** В результате рассмотрения методов работы с внутренним аналого-цифровым преобразователем микроконтроллера STM32 и методов работы с UART был сделан вывод, что оптимальным режимом работы является работа с использованием технологии прямого доступа к памяти. Использование виртуального осциллографа позволяет сделать более удобным отображение аналоговых сигналов за счёт использования большого монитора компьютера. Также реализация на компьютере позволяет реализовать функционал для сравнения и хранения информации с множества каналов и сделать удобным масштабирование графика отображаемого сигнала. Использование внутренних аналого-цифровых преобразователей микроконтроллера позволяет значительно сэкономить на покупке реального осциллографа.

Ключевые слова: виртуальный осциллограф, микроконтроллер, аналого-цифровой преобразователь, UART, DMA, COM-порт

Для цитирования: Дмитриев В.М., Гембух Л.А., Сахабутдинов А.Е. Реализация виртуального осциллографа на базе микроконтроллера STM32 // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 67–75. DOI: 10.14529/ctcr220407

REALIZATING VIRTUAL OSCILLOSCOPE BASED ON THE STM32 MICROCONTROLLER

V.M. Dmitriev, dmitriewvm@gmail.com

L.A. Gembuh, lev.gembuh@mail.ru

A.E. Sakhabutdinov, ale.xander.s@yandex.ru

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

Abstract. The article presents a structural and functional diagram of a virtual oscilloscope, a description of the prototyping board, a description of the “COM-port” block. The modes of operation of the analog-to-digital converter and UART in the STM32 microcontroller are presented. From the presented modes of operation, the optimal ones for the operation of the virtual oscilloscope unit were selected. **The aim of the study.** The main purpose of this work is to develop a virtual oscilloscope based on the STM32 microcontroller by proposing its structural and functional diagram. **Materials and methods.** To develop the structure of a virtual oscilloscope, it is necessary to design a scheme for its interaction with a laboratory setup, choose the best method for relieving stresses from the points of a breadboard, and a method for transferring them to a computer. Also, it is necessary to implement the COM port block and its interaction with the virtual oscilloscope block in the simulation environment. **Results.** A structural-functional diagram of the hardware-software implementation of the operation of a virtual oscilloscope has been developed. The operating modes of the analog-to-digital converter of the STM32 microcontroller are described. The modes of data transfer via UART in STM32 are described. The format of frames transmitted via UART is presented. Also, the COM-port block and its interaction with the virtual oscilloscope block in the MARS simulation environment are implemented. **Conclusion.** As a result of considering the methods of working with the internal analog-to-digital converter of the STM32 microcontroller and the methods of working with UART, it was concluded that the optimal mode of operation is to work using direct memory access technology. Using a virtual oscilloscope makes it easier to display analog signals by using a large computer monitor. Also, the implementation on a computer allows you to implement the functionality for comparing and storing information from multiple channels, as well as make it convenient to scale the graph of the displayed signal. Also, the use of internal analog-to-digital converters of the microcontroller can significantly save on the purchase of a real oscilloscope.

Keywords: virtual oscilloscope, microcontroller, analog-to-digital converter, UART, DMA, COM port

For citation: Dmitriev V.M., Gembuh L.A., Sakhabutdinov A.E. Realizing virtual oscilloscope based on the STM32 microcontroller. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(4):67–75. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220407

Введение

Определение. Виртуальный осциллограф – это осциллограф, реализованный на базе программного комплекса, не имеющий физической реализации. Он позволяет отображать сигнал, полученный с какого-либо устройства или электрической схемы. По сравнению с реальным осциллографом он имеет значительно меньшую стоимость и возможность его простой модификации [1].

Потребность в создании виртуального осциллографа возникла в связи с созданием реально-виртуальной лаборатории (РВЛ). РВЛ – это лаборатория, в которой экспериментальные данные получают с реального объекта, а измерения проводятся в виртуальной среде [2]. На данный момент подобная РВЛ создана на кафедре компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР).

Целью данной работы является разработка виртуального осциллографа для РВЛ. Для её достижения необходимо спроектировать схему взаимодействия виртуального осциллографа с лабораторной установкой, выбрать оптимальный метод для снятия напряжений с точек макетной платы и способ их передачи на компьютер. Также необходимо реализовать блок СОМ-порта и его взаимодействие с блоком виртуального осциллографа в среде моделирования (СМ) MAPS [2, 3].

В данной работе описывается структура виртуального осциллографа, реализованного на базе СМ МАРС. Приведена структурно-функциональная схема лабораторной установки для снятия напряжения и его визуализации на виртуальном осциллографе. Представлено описание макетной платы для проведения эксперимента. Описаны различные режимы опроса аналого-цифрового преобразователя (АЦП), используемого для оцифровки аналогового сигнала с электрической схемы, и выбран оптимальный режим опроса. Проведено сравнение методов передачи информации по UART-USB адаптеру FTDI. Создан программный блок в СМ МАРС, реализующий работу с COM-портом. Описан блок виртуального осциллографа и его взаимодействие с блоком COM-порта.

1. Описание виртуального осциллографа

На рис. 1 представлена структурная схема работы виртуального осциллографа, построенного на базе РВЛ [4].

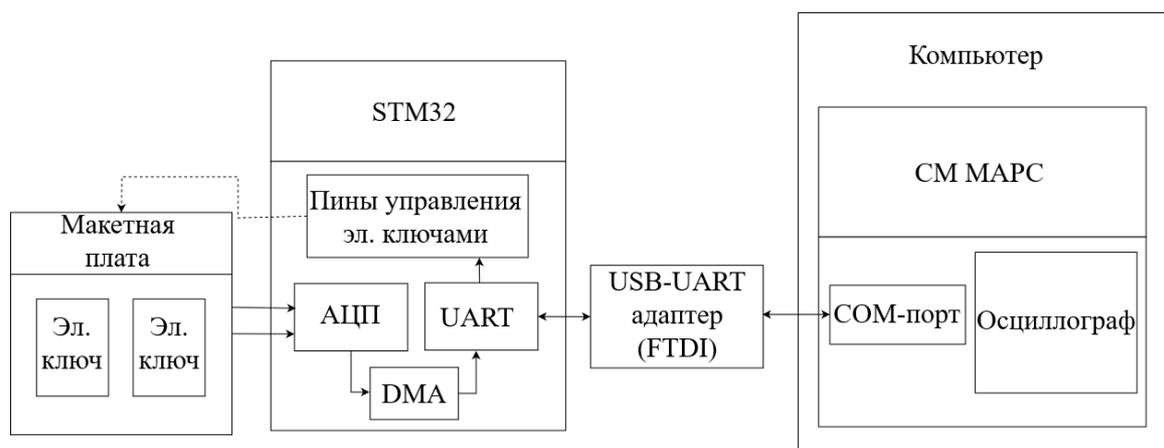


Рис. 1. Структурная схема работы виртуального осциллографа
Fig. 1. Block diagram of the virtual oscilloscope

Работа виртуального осциллографа осуществляется при помощи внутренних АЦП отладочной платы STM32F769I-DISC0, микроконтроллер которой построен на базе архитектуры Advanced RISC Machine (ARM) [5]. Пины, отведенные на АЦП микроконтроллера, соединяются с точками опроса на макетной плате. Далее сигналы из точек опроса, не превышающие 3,3 В, подаются на пины АЦП, где они оцифровываются. Затем оцифрованные значения из кода АЦП конвертируются в вольты, после чего конвертированные значения передаются по USB-UART-адаптеру FTDI, имитирующему работу COM-порта, на компьютер [6]. В свою очередь данные, пришедшие на компьютер, обрабатываются блоком «COM-порт», реализованным в СМ МАРС [7]. Впоследствии обработанные данные визуализируются блоком «Осциллограф» в СМ МАРС.

2. Макетная плата

Макетная плата представляет собой электрическую принципиальную схему, реализующую работу какого-либо устройства (например, фильтр частот, выпрямитель напряжения и т. п.). Схема устройства поделена на отдельные части при помощи электронных ключей. Таким образом, имеется возможность включать или отключать отдельные части схемы. Электронные ключи реализованы при помощи управляемых маломощных транзисторов. Данные транзисторы открываются при получении на свой затвор напряжения от 1,5 до 3 В. Следовательно, их работой можно управлять при помощи микроконтроллера STM32 [8].

Так как на АЦП микроконтроллера нельзя подавать напряжение, превышающее 3,3 В, в электрических принципиальных схемах используются соответствующие делители для постоянного напряжения. Для того чтобы АЦП мог уловить отрицательное напряжение при переменном сигнале, используются операционные усилители. Принцип их работы заключается в смещении напряжения или его понижении. Например, принимая на вход напряжение -17 В, на выходе операционный усилитель выдаст 3,3 В, при 17 В – 0 В, а при нуле – 1,65 В [9]. Схема, представленная на рис. 2, иллюстрирует работу операционного усилителя при напряжении на входе в 17 В.

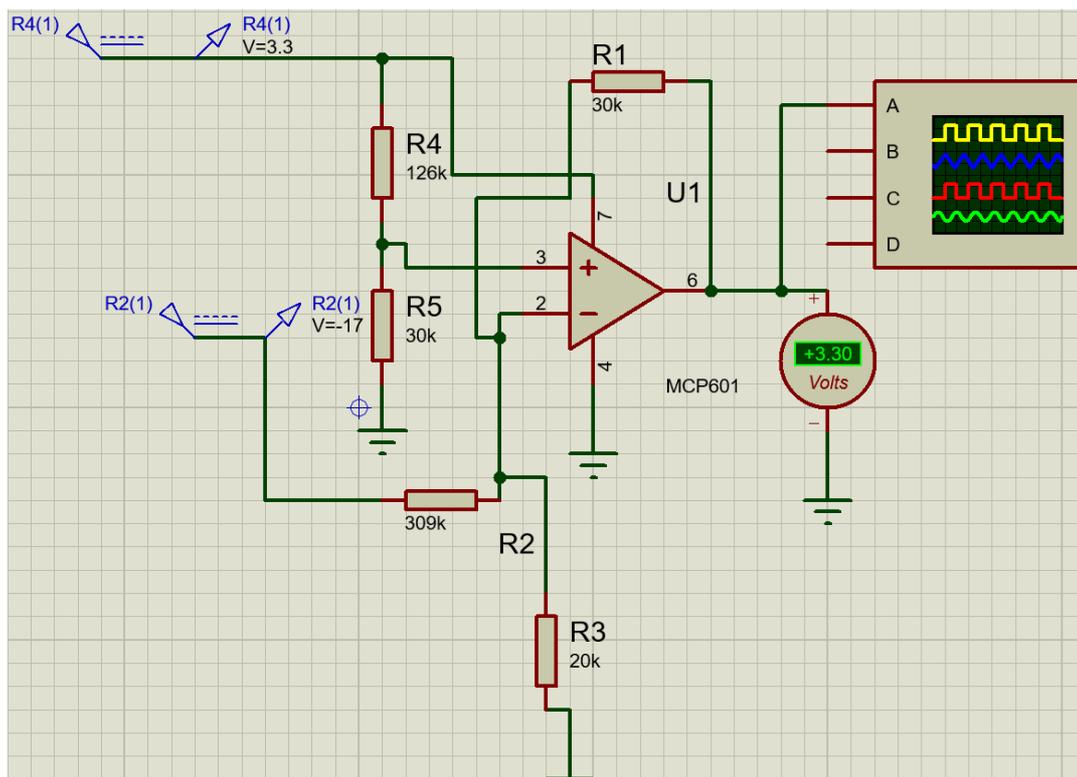


Рис. 2. Схема работы операционного усилителя
Fig. 2. Operational amplifier operation diagram

3. Режимы работы АЦП

Микроконтроллер STM32F769NI оснащен тремя 12-битными АЦП последовательного приближения, 16 каналами и возможностью проводить опрос каналов в трех режимах: однократный опрос, непрерывный опрос и опрос по прерыванию [10]. Существуют следующие разновидности каналов АЦП в STM32: регулярные и инжектированные. Регулярные каналы используются для обычного опроса с нормальным приоритетом. Инжектированные каналы используются для детерминированного во времени опроса с высоким приоритетом. На время опроса инжектированных каналов работа регулярных каналов приостанавливается.

Само преобразование АЦП в программе может осуществляться в трех режимах:

– режим опроса – в программе выставляется команда на опрос АЦП, время ожидания окончания опроса (в миллисекундах) и указатель на буфер. После того как значение сигнала было занесено в регистр данных АЦП, происходит его копирование в буфер. Недостатки данного режима заключаются в обязательном ручном выставлении времени ожидания окончания опроса, а также в затратах вычислительных мощностей ядра микроконтроллера;

– режим прерывания – опрос АЦП происходит в непрерывном режиме. Каждый раз, когда АЦП заканчивает преобразование данных, происходит прерывание, после чего в программе происходит копирование данных в буфер. Недостатками данного режима являются затраты вычислительных мощностей ядра микроконтроллера;

– режим работы через DMA – в данном режиме опрос АЦП осуществляется без участия ядра микроконтроллера, с использованием контроллера DMA. Таким образом, данный режим является оптимальным при непрерывном опросе каналов АЦП, так как он не задействует ресурсы микропроцессора и минимизирует задержку между преобразованиями каналов АЦП [11].

Поскольку для работы виртуального осциллографа в реальном времени с высокой точностью требуется высокая скорость получения данных о напряжении с макетной платы, в качестве основного режима работы АЦП был выбран режим работы через DMA. Само преобразование данных происходит в непрерывном режиме, с использованием двух АЦП, в каждом из которых задействован один регулярный канал. Использование двух АЦП позволяет ускорить процесс получения данных о напряжении с двух точек макетной платы в отличие от использования одного

АЦП с двумя регулярными каналами, так как несколько АЦП позволяют работать независимо друг от друга в одноканальном режиме.

4. Передача данных по UART

UART – это последовательный интерфейс передачи данных, который служит для коммуникации между цифровыми устройствами.

В РВЛ для связи микроконтроллера и компьютера используется UART-USB-адаптер от компании FTDI. Максимальная скорость передачи данных интерфейса UART – 12,5 Мбит/с [12].

Поскольку данные по UART передаются в форме кадров, для передачи данных необходимо разработать формат передаваемого кадра. На рис. 3 представлен формат кадра, передаваемого от микроконтроллера на COM-порт.

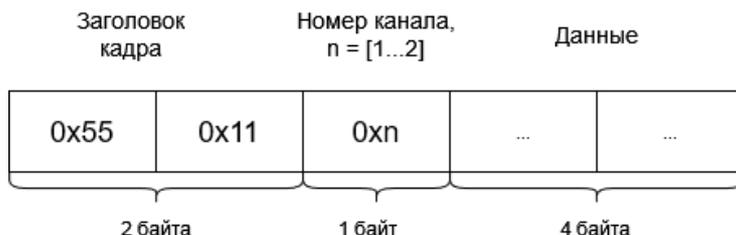


Рис. 3. Формат передаваемого кадра
Fig. 3. The format of the transmitted frame

На заголовок кадра отведено 2 байта. Это сделано для того, чтобы сформировать уникальную шестнадцатеричную комбинацию, которая позволит определить назначение кадра. Передача номера канала осуществляется для того, чтобы понимать, для какого канала виртуального осциллографа предназначены принимаемые данные. В данные записывается значение напряжения формата числа с плавающей запятой.

Перед тем как отправить значение напряжения с АЦП, необходимо преобразовать значение напряжения, полученное в виде цифрового кода, в значение напряжения с плавающей точкой по формуле

$$V = \frac{ADCcode \cdot Vref}{ADCres},$$

где ADCcode – цифровой код АЦП для напряжения; Vref – опорное напряжение микроконтроллера; ADCres – разрешение АЦП микроконтроллера. Так как в микроконтроллере используется 12-битный АЦП, значение ADCres равно 4096 [13].

После пересчета цифрового кода в напряжение мы получаем напряжение в диапазоне от 0 до 3,3 В, но так как мы уменьшили исходное напряжение с макетной платы с помощью делителя напряжения, нам необходимо пересчитать полученное напряжение в исходное методом пропорции. Так, например, мы получили значение 2,7 В с макетной платы, при этом мы знаем, что максимальное значение напряжения схемы равно 15 В. Тогда мы сопоставляем, что 3,3 В – это 15 В на схеме, соответственно 2,7 В будет x . Отсюда мы получаем, что x равно 12,27 В.

Существуют следующие способы передачи данных по UART с микроконтроллера:

– передача данных в обычном режиме – данные передаются в режиме блокировки, т. е. микроконтроллер будет блокировать все остальные операции до тех пор, пока передача данных не будет завершена. Этот метод применяется в случае, если используется только UART и ничего больше, иначе это повлияет на все остальные операции;

– передача данных в режиме прерывания – в данном режиме передача происходит в неблокирующем режиме или в фоновом режиме. Так что остальные процессы работают как надо;

– передача данных в режиме DMA – данный режим работает примерно так же, как передача данных в режиме прерывания, осуществляет передачу данных в неблокирующем режиме. Однако в отличие от режима прерывания, который использует ресурсы процессора микроконтроллера, данный режим использует буфер DMA в обход процессора. Это позволяет сократить время передачи данных [14].

В качестве режима передачи данных по UART с микроконтроллера на компьютер был выбран режим передачи через DMA.

5. COM-порт

Для взаимодействия микроконтроллера с компьютером используется COM-порт. На рис. 4 представлен топологический портрет блока «COM-порт», разработанного в СМ МАРС. Данный блок является виртуальным инструментом [15].

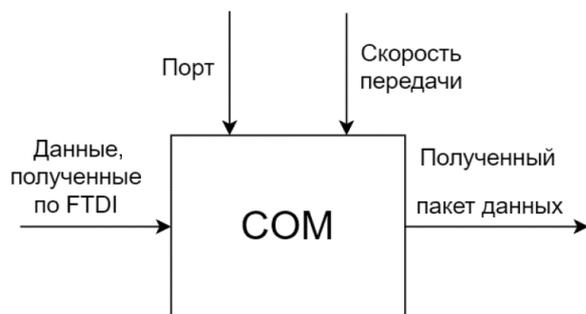


Рис. 4. Топологический портрет блока «COM-порт»
Fig. 4. Topological portrait of the «COM port» block

Данный блок визуализирует программную реализацию приема и передачи данных с COM-порта. На вход блока принимаются данные с платы FTDI. Параметрами блока являются номер порта и его скорость. На выход передаются пакеты данных, в которых содержатся значения напряжения для разных каналов.

Программная реализация работы данного блока заключается в циклическом приеме пакетов данных. В блоке реализованы функции покадрового разбора принимаемых данных с их разделением по каналам, конвертация принятых байт в значения с плавающей точкой, накопления

данных, усреднения накопленных данных и передачи сообщения на другой блок.

После того как данные были накоплены и усреднены, они передаются на блок виртуального осциллографа (рис. 5).

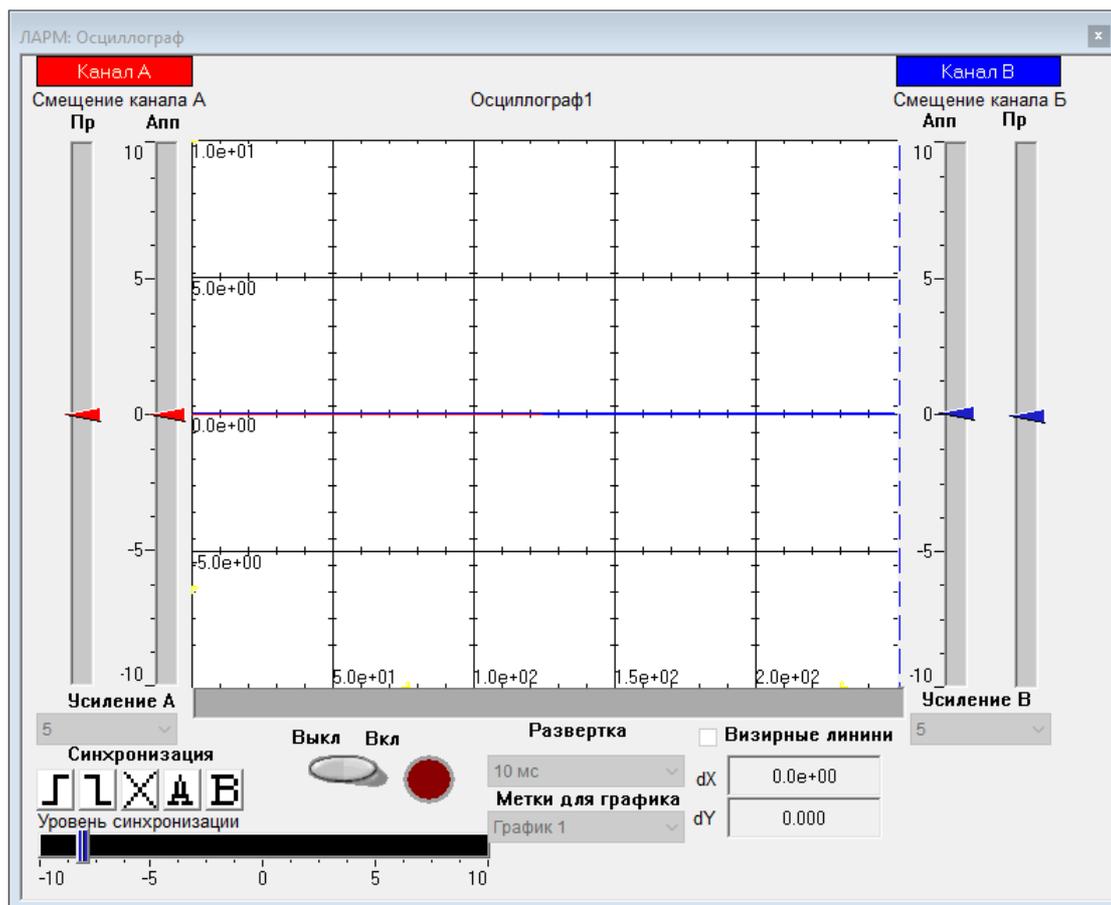


Рис. 5. Панель блока виртуального осциллографа
Fig. 5. Panel of the virtual oscilloscope unit

Данный блок позволяет отображать осциллограммы для двух сигналов. В блоке реализованы автоматический масштаб по оси X и по оси Y, задание уровня синхронизации, коэффициентов усиления и смещения сигналов.

После принятия данных блоком график изменения значения напряжения в зависимости от канала будет отображен в окне виртуального осциллографа.

Заключение

В данной работе представлена структурно-функциональная схема программно-аппаратной реализации работы виртуального осциллографа. Описаны режимы работы АЦП микроконтроллера STM32. В качестве оптимального режима был выбран режим работы с DMA. Описаны режимы передачи данных по UART в STM32 с приведением формата передаваемых кадров. В качестве оптимального режима передачи данных по UART был выбран режим передачи данных через DMA. Также программно реализован блок COM-порта и его взаимодействие с блоком виртуального осциллографа в CM MAPC.

Список литературы

1. Ping Gong, Wei Zhou. Design and Implementation of Multifunctional Virtual Oscilloscope Using USB Data-Acquisition Card // International Workshop on Information and Electronics Engineering (IWIEE). 2012. P. 3245–3249. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.01.474
2. Slavko Kocijancic, Colm O’Sullivan. Real or Virtual Laboratories in Science Teaching – is this Actually a Dilemma? // Informatics in Education. 2004. Vol. 3, no. 2. P. 239–250. DOI: 10.15388/infedu.2004.17
3. MAPC – среда моделирования технических устройств и систем / В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, Т.Н. Зайченко, Т.В. Ганджа. Томск: В-Спектр, 2011. 278 с.
4. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В., Панов С.А. Система виртуальных инструментов и приборов для автоматизации учебных и научных экспериментов // Программные продукты и системы. 2016. № 3. С. 154–162.
5. Nikola Zlatanov. ARM Architecture and RISC Applications. IEEE Computer Society, 2016. 20 p.
6. FTDI chip [Электронный ресурс]. URL: <https://ftdichip.com> (дата обращения: 11.08.2022).
7. Jian Huang. Research of Serial Communication Based on STM // 7th International Conference on Education, Management, Information and Computer Science, Advances in Computer Science Research. 2017. Vol. 73. P. 191–193.
8. Кудрявцев И.А., Фалкин В.Д. Электронные ключи: учеб. пособие. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2002. 24 с.
9. Измерение отрицательного напряжения с помощью АЦП [Электронный ресурс]. URL: <https://hubstub.ru/circuit-design/92-kak-izmerit-otricatelnoe-napryazhenie-s-pomoschyu-acp.htm> (дата обращения: 10.08.2022).
10. Mohsen Fallah, Seyyed Alireza Davodi Navokh, Mehran Mozaffari-Jovein. STM32 ADC Tutorial with application to real-time control. Mashhad: Ferdowsi University of Mashhad, CAD/CAM Laboratory, 2021. 65 p.
11. Carmine Noviello. Mastering STM32. Leanpub, 2017. 792 p.
12. Umakanta Nanda, Sushant Pattnaik. Univer Universal Asynchronous Receiver and Transmitter (UART) // 3rd International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS). 2016. P. 1–5, DOI: 10.1109/ICACCS.2016.7586376
13. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) [Электронный ресурс]. URL: <http://themagicSmoke.ru/courses/stm32/adc.html> (дата обращения: 11.08.2022).
14. Teng Gao, Ji-Yan Zou, De-Quan Wang, Jin-Hua Din, and Zhen-Yuan. CDT Communication Protocol Realization based on STM32 // International Conference on Education, Management, Information and Medicine (EMIM 2015). 2015. P. 100–106. DOI: 10.2991/emim-15.2015.20
15. СВИП – система виртуальных инструментов и приборов / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, В.В. Ганджа, Ю.И. Мальцев. Томск: В-Спектр, 2014. 216 с.

References

1. Ping Gong, Wei Zhou. Design and Implementation of Multifunctional Virtual Oscilloscope Using USB Data-Acquisition Card. In: *International Workshop on Information and Electronics Engineering (IWIEE)*. 2012. P. 3245–3249. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.01.474
2. Slavko Kocijancic, Colm O’Sullivan. Real or Virtual Laboratories in Science Teaching – is this Actually a Dilemma? *Informatics in Education*. 2004;3(2):239–250. DOI: 10.15388/infedu.2004.17
3. Dmitriyev V.M., Shutenkov A.V., Zaychenko T.N., Gandzha T.V. *MARS – sreda modelirovaniya tekhnicheskikh ustroystv i sistem* [MARS – environment for modeling technical devices and systems]. Tomsk: V-Spektr Publ.; 2011. 278 p. (In Russ.)
4. Dmitriyev V.M., Gandzha T.V., Panov S.A. The system of virtual instruments and devices for education and scientific experiment automation. *Software & Systems*. 2016;(3):154–162. (In Russ.)
5. Nikola Zlatanov. *ARM Architecture and RISC Applications*. IEEE Computer Society; 2016. 20 p.
6. *FTDI chip*. Available at: <https://ftdichip.com> (accessed 11.08.2022).
7. Jian Huang. Research of Serial Communication Based on STM. In: *7th International Conference on Education, Management, Information and Computer Science, Advances in Computer Science Research*; 2017. Vol. 73. P. 191–193.
8. Kudryavcev I.A., Falkin V.D. *Elektronnye klyuchi: uchebnoe posobie* [Electronic keys: study guide]. Samara: Samara State Aerospace University; 2002. 24 p. (In Russ.)
9. *Izmerenie otricatelnogo napryazheniya s pomoshch'yu ACP* [Negative voltage measurement with ADC]. (In Russ.) Available at: <https://hubstub.ru/circuit-design/92-kak-izmerit-otricatelnoe-napryazhenie-s-pomoschyu-acp.htm> (accessed 10.08.2022).
10. Mohsen Fallah, Seyyed Alireza Davodi Navokh, Mehran Mozaffari-Jovein. *STM32 ADC Tutorial with application to real-time control*. Mashhad: Ferdowsi University of Mashhad, CAD/CAM Laboratory; 2021. 65 p.
11. Carmine Noviello. *Mastering STM32*. Leanpub; 2017. 792 p.
12. Umakanta Nanda, Sushant Pattnaik. Univer Universal Asynchronous Receiver and Transmitter (UART). In: *3rd International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*; 2016. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICACCS.2016.7586376
13. *Analogo-cifrovoy preobrazovatel' (ACP)* [Analog to digital converter (ADC)]. (In Russ.) Available at: <http://themagicssmoke.ru/courses/stm32/adc.html> (accessed 11.08.2022).
14. Teng Gao, Ji-Yan Zou, De-Quan Wang, Jin-Hua Din, and Zhen-Yuan. CDT Communication Protocol Realization based on STM32. In: *International Conference on Education, Management, Information and Medicine (EMIM 2015)*; 2015. P. 100–106. DOI: 10.2991/emim-15.2015.20
15. Dmitriyev V.M., Gandzha T.V., Gandzha V.V., Mal'tsev Yu.I. *SVIP – sistema virtual'nykh instrumentov i priborov* [SVIP – a system of virtual instruments and devices]. Tomsk: V-Spektr Publ.; 2014. 216 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Дмитриев Вячеслав Михайлович, д-р техн. наук, проф. кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия; dmitriewvm@gmail.com.

Гембух Лев Алексеевич, аспирант кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия; lev.gembuh@mail.ru.

Сахабутдинов Александр Евгеньевич, аспирант кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия; ale.xander.s@yandex.ru.

Information about the authors

Vyacheslav M. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Computer Systems in Management and Design, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia; dmitriewvm@gmail.com.

Lev A. Gembuh, Postgraduate Student of the Department of Computer Systems in Management and Design, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia; lev.gembuh@mail.ru.

Alexander E. Sakhabutdinov, Postgraduate Student of the Department of Computer Systems in Management and Design, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia; ale.xander.s@yandex.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 12.08.2022

The article was submitted 12.08.2022

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

Научная статья
УДК 51-74 + 005
DOI: 10.14529/ctcr220408

МОДИФИКАЦИИ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИАГНОСТИКОЙ

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

Д.В. Гилёв², denis.gilev@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1040-5696>

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Статья посвящена задаче модификации алгоритмов системы управления диагностикой для различных сфер народного хозяйства. В проведенных ранее исследованиях было установлено, что задача управления диагностикой является важной и необходимой, при этом для её решения требуются новые эффективные методы, позволяющие с высокой точностью относить объекты к тому или иному классу вне зависимости от их внутренней составляющей. При этом выдвигаются основные требования к диагностическим системам. **Цель исследования.** Целью данной работы является построение модификаций алгоритмов метода комитетов для решения задачи распознавания образов, а также их иллюстрация на конкретном примере диагностики сторожевых головных болей при инсульте от других. **Материалы и методы.** Модификация алгоритмов метода комитетов производится на основе представления системы неравенств в полярной форме при использовании алгоритма построения минимального комитета исходной системы. Показывается эффективность конечно-шаговых алгоритмов, основанных на понижении размерности исходной задачи, в том числе метод проектирования на плоскость. Достоинством этого метода является его малая вычислительная сложность, а также содержание минимального числа членов комитета системы неравенств. **Результаты.** Модификации алгоритмов метода комитетов применяются для конкретной задачи диагностики головных болей, при этом метод оказывается эффективным, о чём говорят низкие ошибки распознавания первого и второго рода на тестовой выборке. Также делается вывод, что задача диагностики имеет общую структуру во всех областях, в том числе технической, экономической, психологической, криминалистической, в связи с чем предложенные алгоритмы могут быть применены и для указанного ряда задач. Также возможность применения метода комитетов как некоторого ансамбля методов, на основе которого возможно создание автоматизированной системы управления диагностикой. **Заключение.** Полученные результаты позволяют утверждать, что использование модифицированных алгоритмов метода комитетов позволяет осуществлять эффективное управление диагностикой головных болей.

Ключевые слова: диагностика, метод комитетов, задача распознавания образов, прогноз, ансамбль методов

Благодарности: Авторы выражают благодарность профессору, доктору медицинских наук Елене Разумовне Лебедевой за предоставленную базу данных по головным болям и за помощь в медицинской интерпретации.

Для цитирования: Логиновский О.В., Гилёв Д.В. Модификации алгоритмов автоматизированной системы управления диагностикой // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 76–84. DOI: 10.14529/ctcr220408

Original article

DOI: 10.14529/ctcr220408

MODIFICATIONS OF ALGORITHMS OF THE AUTOMATED DIAGNOSTIC MANAGEMENT SYSTEM

O.V. Loginovskiy¹, loginovskiiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>**D.V. Gilev**², denis.gilev@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1040-5696>¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The article is devoted to the task of modifying algorithms of the diagnostic management system for various spheres of the national economy. In previous studies, it was found that the task of managing diagnostics is important and necessary, while new effective methods are required to solve it, allowing objects to be assigned to a particular class with high accuracy, regardless of their internal component. At the same time, the basic requirements for diagnostic systems are put forward. **The aim of the study.** The purpose of this work is to construct modifications of the algorithms of the committee method for solving the problem of pattern recognition, as well as their illustration on a specific example of the diagnosis of sentinel headaches in stroke from others. **Materials and methods.** The modification of the algorithms of the committee method is based, on the representation of the system of inequalities in polar form, using the algorithm for constructing the minimum committee of the original system. The efficiency of finite-step algorithms based on reducing the dimension of the original problem, including the method of projecting onto a plane, is shown. The advantage of this method is its low computational complexity, as well as the content of the minimum number of members of the inequality system committee. **Results.** Modifications of the algorithms of the committees method are used for a specific task of diagnosing headaches, while the method proves to be effective, as evidenced by low recognition errors of the first and second kind in the test sample. It is also concluded, that the diagnostic task has a common structure in all areas, including technical, economic, psychological, forensic, and therefore the proposed algorithms can be applied to the specified number of tasks. There is also the possibility of using the committee method as a certain ensemble of methods, on the basis of which it is possible to create some automated diagnostic management system. **Conclusion.** The results obtained allow us to assert that the use of modified algorithms of the committee method allows for effective management of headache diagnostics.

Keywords: diagnostics, method of committees, pattern recognition task, forecast, ensemble of methods

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Professor, Doctor of Medical Sciences Elena Razumovna Lebedeva for providing a database of headaches and for assistance in medical interpretation.

For citation: Loginovskiy O.V., Gilev D.V. Modifications of algorithms of the automated diagnostic management system. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(4):76–84. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220408

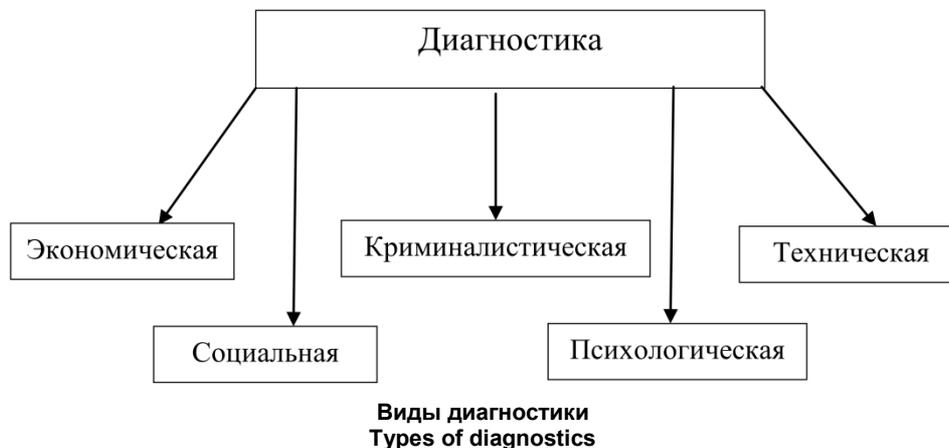
Введение

Вопросы рационального управления объектами социальных и экономических систем неразрывно связаны с диагностикой. В адекватном и достаточно раннем диагнозе нуждаются не только больные люди, но и экономические, социальные и политические системы и институты, культура, наука и техника [1]. При этом процесс диагностики позволяет не только составить текущее состояние исследуемого объекта, но и увидеть элементы и взаимные связи всех его механизмов, что позволяет лучше понимать, на что необходимо направить усилие и внимание, какие именно управленческие решения принимать. Для этого необходимо изучать как сам процесс диагностики, заключающийся в теоретических аспектах, так и непосредственно методы, на основе которых возможно построение искусственных диагностических систем.

Изучение и формирование гибких технологий диагностики, во-первых, представляются важными для более глубокого понимания природы научного познания в целом, а во-вторых, позволяют решать конкретные прикладные задачи, тем самым увеличивая эффективность управления организационными и производственными структурами.

1. Обзор литературы

В настоящее время наиболее развитой областью является медицинская диагностика, хотя сама диагностика как наука появилась сотни лет назад и развивалась одновременно с химией, биологией, физикой и другими. Существуют различные виды диагностик, которые можно разделить по областям их применения. На рисунке указаны основные такие виды.



При этом к диагностике в [2, с. 8] выдвигаются некоторые требования, которые могут служить общепологающими ко всем её видам. Эти условия заключаются в целенаправленности, то есть точном отборе объектов для изучения, и непрерывности. Также должен учитываться комплексный подход к диагностике, при котором объект рассматривается не как отдельная конструкция, а как некоторый кластер взаимосвязей с внешней средой.

В [3, с. 11] диагностика определяется как «главный инструмент определения границ между...». При этом каких границ и между чем и чем – уточняется в зависимости от того, каков сам объект диагностики. После определения границ и выделения объекта необходимо перейти к следующим этапам: сравнение, анализ, прогнозирование, интерпретация, контроль за воздействием на диагностируемых различных диагностических методов.

Стоит отметить, что диагностика не ставит целью получение нового знания [4, с. 12, 13], она призвана зафиксировать текущее состояние по определённым параметрам и оценить его с позиции представления об «идеальном» состоянии. И, следовательно, цель диагностики – описание состояния и прогнозирование ситуации. Из чего формулируются следующие подходы к диагностике:

- нормативный, который опирается на традиционную концепцию управления;
- ситуационный, в котором процесс управления представляется как непрерывная цепь уникальных, неповторимых управленческих ситуаций, с которыми сталкивается лицо, принимающее решение;
- проблемный, рассматривающий управленческую ситуацию как уникальное сочетание проблем, которые возникают на различных уровнях.

Безусловно, необходимо учитывать специфику области, к которой относится диагностируемый объект. Так, например, для диагностики деятельности предприятия применяют специальные методы. Следуя [5], их можно подразделить на стратегические, оперативные и методы самодиагностики, уделяя при этом особое внимание планированию диагностики. Как показано в [6], немаловажным является определение ожидаемых результатов диагностики в виде фиксации количественных и качественных показателей объекта, причём неважно, человек это, организация или система отопления.

Всё вышеизложенное позволяет прийти к выводу, что, несмотря на большое разнообразие видов диагностики в зависимости от отраслей, невзирая на их специфику, которая отдельно изучается в каждой области, вопросы диагностики подчинены формальной логике. Иными словами, сущность диагностики можно изложить с помощью математических моделей, используя при этом автоматизированные процессы, что позволяет формализовать и упростить процесс диагностирования. Причём это возымело свои плоды в экономической [7], педагогической [8, 9], техни-

ческой [10], медицинской диагностике [11]. Основой математических аспектов диагностики служат теория распознавания образов и современные методы машинного обучения [12].

Основными математическими моделями задач распознавания образов, которые позволяют решать диагностические проблемы, являются дискриминантный анализ, таксономия, оценка и выбор информативных систем признаков, метод комитетов, метод ближайших соседей, а также некоторые специфические алгоритмы, такие как логистическая регрессия, случайный лес, нейронные сети.

2. Материалы и методы

Проблемы диагностики, в частности дифференциальной, как показал анализ литературы, эффективно сводятся к математическим задачам распознавания образов. Часто для их решения прибегают к моделям принятия решений на основе консилиума. По сути строятся некоторые решающие правила, которые можно представить в виде системы неравенств, в большинстве случаев несовместных. Для получения решения таких систем используется метод комитетов, благодаря которому постановка задачи модифицируется и становится непротиворечивой.

Комитетом несовместной системы однородных строгих линейных неравенств

$$(c_j, x) > 0, \quad j = 1, \dots, m,$$

где $c_j \in R^n, x \in R^n$ называется такое множество $\{x^1, \dots, x^{2k+1}\} \in R^n$, что каждому неравенству системы удовлетворяют не менее $k+1$ элементов этого множества [13]. Первыми методами построения комитетов были итерационные методы обучения персептронов задаче дискриминантного анализа, описанные в [14]. При этом одними из самых эффективных оказались конечношаговые алгоритмы, которые основаны на понижении размерности исходной задачи [15]. Среди них можно выделить метод проектирования на плоскость.

Основными достоинствами этого метода можно считать его широкое применение для решения конкретных задач дискриминантного анализа, в особенности из-за малой вычислительной сложности, а также то, что полученный в результате алгоритм содержит не более m членов, что соответствует оценке числа членов минимального комитета системы неравенств. На основе указанного метода был предложен модифицированный алгоритм, основанный на представлении точки в полярных координатах.

Модифицированный алгоритм. Пусть имеется система неравенств над R^2 :

$$(a_j, h) > 0, \quad j = 1, \dots, m.$$

Предполагаем, что в множестве векторов $\{a_j : j = 1, \dots, m\}$ нет коллинеарных пар и нулевых векторов. Представление неравенства в полярной форме производится по следующей схеме.

1. Представим точку a_j в полярных координатах по формулам

$$\varphi_j^* = \begin{cases} \arcsin(a_{j2} / r_j), & \text{если } a_{j1} > 0, a_{j2} \geq 0; \\ \pi - \arcsin(a_{j2} / r_j), & \text{если } a_{j1} \leq 0, a_{j2} - \text{любое}; \\ 2\pi + \arcsin(a_{j2} / r_j), & \text{если } a_{j1} > 0, a_{j2} < 0, \end{cases}$$

где $r_j = \sqrt{a_{j1}^2 + a_{j2}^2} \neq 0$.

2. Тогда неравенство $(a_j, h) > 0$ запишется в виде

$$(\sigma_j^1, \varphi_j^1) = \begin{cases} (-1, \varphi_j^* + \pi / 2), & \text{если } \varphi_j^* \in [0, \pi / 2); \\ (+1, \varphi_j^* - \pi / 2), & \text{если } \varphi_j^* \in [\pi / 2, 3\pi / 2); \\ (-1, \varphi_j^* - 3\pi / 2), & \text{если } \varphi_j^* \in [3\pi / 2, 2\pi); \end{cases}$$

$$(\sigma_j^1, \varphi_j^1) = (-\sigma_j^1, \varphi_j^1 + \pi).$$

Таким образом, неравенству $(a_j, h) > 0$, заданному в декартовых координатах, в полярных координатах будут соответствовать две пары, разделенные чертой: $(\sigma_j^1, \varphi_j^1) | (\sigma_j^2, \varphi_j^2)$.

При этом неравенство $(+1, \varphi_j^1) | (-1, \varphi_j^2)$ будет определять полуплоскость, содержащую все лучи с углами полярной оси больше, чем φ_j^1 , но меньше, чем φ_j^2 . Аналогично неравенство $(-1, \varphi_j^1) | (+1, \varphi_j^2)$ будет определять полуплоскость, содержащую все лучи с углами полярной оси меньше, чем φ_j^1 , и все лучи к полярной оси больше, чем φ_j^1 .

Представив каждое неравенство исходной системы в полярной форме, получим множество пар $\{(\sigma_j^1, \varphi_j^1) \cup (\sigma_j^2, \varphi_j^2) | j \in I\}$. Упорядочив пары этого множества по возрастанию величины полярного угла, получим последовательность пар длины $2m$, состоящую из двух половин, которые отделим друг от друга чертой: $(\sigma_{j_1}^1, \varphi_{j_1}^1), \dots, (\sigma_{j_m}^1, \varphi_{j_m}^1) | (\sigma_{j_1}^2, \varphi_{j_1}^2), \dots, (\sigma_{j_m}^2, \varphi_{j_m}^2)$.

Такая структура последовательности пар становится понятной из того, что $\varphi_{j_k}^2 = \varphi_{j_k}^1 + \pi$ и $0 \leq \varphi_{j_1}^1 \leq \varphi_{j_2}^1 \leq \dots \leq \varphi_{j_m}^1 < \pi$.

Если в последовательности пар смежные пары таковы, что первый элемент предшествующей пары равен $+1$, а первый элемент последующей пары равен -1 , то мы будем говорить, что имеет место положительная смена знаков. В дальнейшем, говоря о положительных сменах знаков, будем иметь в виду и внешнюю положительную смену знаков.

Из геометрических соображений ясно, что всякая положительная смена знаков в последовательности пар определяет конус решений некоторой максимальной совместной подсистемы исходной системы.

Далее можно обратиться к алгоритму построения минимального комитета исходной системы, который был предложен в работах [16]. Суть этого алгоритма заключается в следующем.

1. Методом свертывания С.Н. Черникова находим индексы всех минимально несовместных подсистем системы: T_1, T_2, \dots, T_p .

2. По множествам T_1, T_2, \dots, T_p строим индексы всех минимально несовместных подсистем системы: J_1, J_2, \dots, J_p .

3. Вводим в рассмотрение векторы $B_j \in R^m$, у которых на l -м месте стоит 1 , если $l \in J_i$, и -1 в противном случае. Получаем задачу целочисленного программирования:

$$\begin{cases} \min(v_1 + v_2 + \dots + v_s); \\ v_1 B_1 + v_2 B_2 + \dots + v_s B_s > 0; \\ v = (v_1, v_2, \dots, v_s) \geq 0; \\ v - \text{целочисленный вектор.} \end{cases}$$

4. Пусть вектор $\bar{v} = (\bar{v}_1, \bar{v}_2, \dots, \bar{v}_s) \in R^s$ – решение задачи и j_1, j_2, \dots, j_g – номера ненулевых компонент вектора \bar{v} . Для каждой из максимально совместной подсистемы исходной системы с индексами $J_{j_1}, J_{j_2}, \dots, J_{j_g}$ находим по одному решению: $x_{j_1}, x_{j_2}, \dots, x_{j_g} \in R^n$. Тогда множество $\{x_{j_1}, \dots, x_{j_1}; \dots; x_{j_g}, \dots, x_{j_g}\}$ будет минимальным комитетом системы.

$$\bar{v}_{j_1} \quad \bar{v}_{j_g}$$

Для реализации пунктов 1, 3, 4 имеются хорошо разработанные методы.

На основании указанного выше алгоритма предлагается алгоритм получения всех максимально совместных подсистем системы по известным индексам всех минимально несовместных подсистем.

Пусть заданы множество $I = \{1, 2, \dots, m\}$ и подмножества номеров T_1, T_2, \dots, T_p , составляющих МНП: $T_i \subseteq I, i = 1, 2, \dots, p$.

Необходимо найти все такие различные множества $J_1, J_2, \dots, J_s : J_j \subseteq I$, каждое из которых

не содержало бы ни одного из множеств T_1, T_2, \dots, T_p , но пополнение хотя бы одного из множеств J_1, J_2, \dots, J_s новым элементом из I приводило бы к нарушению этого свойства.

Введем бинарные наборы

$$\alpha_i = (\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{im}),$$

$$\text{где } \alpha_i \in E^m, E = \{0, 1\}, \alpha_{il} = \begin{cases} 0, & \text{если } l \in T_i; \\ 1, & \text{если } l \notin T_i. \end{cases}$$

Получим множество наборов $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p \in E^m$. Организуем множества

$$A_i = \{\alpha \in E^m \mid \alpha \leq \alpha_i\} \quad (i = 1, 2, \dots, p).$$

Из них образуем множество $A = \bigcup_{i=1}^p A_i$.

Нетрудно заметить, что если взять произвольный набор $\alpha \in A$, то множество номеров его нулевых компонент будет содержать хотя бы одно из множеств T_1, T_2, \dots, T_p .

С другой стороны, если взять произвольное подмножество $T \subseteq I$ такое, что существует i , при котором $T \supseteq T_i$, и поставить ему в соответствие набор $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \in E^m$, построенный по правилу

$$\alpha_l = \begin{cases} 0, & \text{если } l \in T_i; \\ 1, & \text{если } l \notin T_i, \end{cases}$$

то $\alpha \in A$.

Приведенные как уже известные алгоритмы, так и основанные на них модификации, во-первых, дополняют теоретические основы метода комитетов и, во-вторых, позволяют внедрить их в пакеты программ диагностики для решения в том числе медицинских задач.

3. Прикладной пример и обсуждение

Как было сказано выше, метод комитетов активно применяется на практике для решения широкого ряда задач. С целью иллюстрации работы выше описанных алгоритмов в среде программирования Matlab была решена конкретная задача классификации сторожевых головных болей при инсульте от всех остальных первичных головных болей.

Главной задачей исследования, в котором участвовали и неврологи, являлось определение четких, клинически обоснованных симптомов специфической головной боли, связанной с ишемическим инсультом. Неврологи наблюдали за состоянием двух групп пациентов – с первым инсультом и тех, у кого отсутствовали какие-либо острые неврологические нарушения или тяжелые расстройства (инсульт, опухоль и травмы головного мозга, эпилепсия, деменция и другие серьезные неврологические и соматические заболевания). Первая группа насчитывала 550 человек, вторая, контрольная, – 192.

Исследователи классифицировали различные головные боли, возникавшие у пациентов из обеих групп в течение года до поступления в одну из больниц Екатеринбурга, а также за неделю до инсульта и в день инсульта. Были выделены три типа головных болей: головные боли, уже знакомые пациентам; головные боли, которых никогда не было ранее (боли нового типа) и головные боли с изменением характеристик (отличались сильной интенсивностью, высокой частотой, продолжительностью, становились пульсирующими, сопровождалась тошнотой, рвотой, свето- и звукобоязнью, плохо поддавались действию анальгетиков). Далее были применены различные методы статистического анализа, в том числе метода комитетов. В данной статье мы не акцентируем внимание на медицинской постановке задачи, так как это всего лишь иллюстративный пример работы указанных выше алгоритмов.

Остановимся лишь на оценке качества полученной модели. Результаты прогноза представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Прогноз метода комитетов на обучаемой выборке

Table 1

Forecast of the committee method on the trained sample

Факт / Прогноз	Присутствие признака	Отсутствие признака
Присутствие признака	96,1 %	3,9 % (ошибка II рода)
Отсутствие признака	15,3 % (ошибка I рода)	84,7 %

Таблица 2

Прогнозы метода комитета на тестовой выборке

Table 2

Forecasts of the committee's method on a test sample

Факт / Прогноз	Присутствие признака	Отсутствие признака
Присутствие признака	90,2 %	9,8 % (ошибка II рода)
Отсутствие признака	18,5 % (ошибка I рода)	81,5 %

В целом модель дает хорошие прогнозы, имея высокую степень точности классификации головных болей, то есть отделения сторожевой головной боли при инсультах от других. А именно 81,5 % правильных результатов, ошибка первого рода составила 18,5 %, а второго рода – 9,8 %.

Таким образом, можно сказать, что выше описанные алгоритмы эффективно работают для диагностики сторожевой головной боли, а так как согласно изученной литературе в целом задача диагностики имеет общую структуру во всех областях, в том числе технической, экономической, психологической, криминалистической и иных, то предложенные алгоритмы вполне возможно применять и для указанного ряда задач.

Выводы

Безусловно, при применении указанных алгоритмов на конкретных практических задачах в различных сферах возможны различные ситуации, связанные со спецификой области. Может оказаться, что работа метода комитетов не будет иметь высокие результаты классификации либо в нём не будет смысла, в таком случае можно использовать методы машинного обучения, такие как кластерный анализ, случайный лес, логистическую регрессию, нейронные сети. Ничего нового на данный момент в этих методах нет, уже хорошо изучены все их достоинства и недостатки. Но даже в этом случае возможно применение метода комитетов как некоторого ансамбля методов, на основе которого возможно создание автоматизированной системы управления диагностикой, которая будет включать в себя все перечисленные выше методы. Таким образом, необходимо работать в направлении того, чтобы соединить модели в метод комитетов, при этом станет возможно получить сбалансированный метод диагностики, а также прогнозирования, классификации, минимизировав ошибки первого и второго рода, то есть снизить процент неверных предсказаний.

Список литературы

1. Кротков Е.А. Диагностика как универсальная форма научного познания (эпистемологический анализ) // Вопросы философии. 2014. № 3. С. 85–94.
2. Кочетов А.И. Педагогическая диагностика. Славянск-на-Кубани: Славян. филиал Армавир. гос. пед. ин-та, 1998.
3. Слободчиков В.И. Теория и диагностика развития в контексте психологической антропологии // Психология обучения. 2014. № 1. С. 4–34.
4. Щербина В.В. Средства социологической диагностики в системе управления. М.: Изд-во Московского университета, 1993. 116 с.
5. Григан А.М. Управленческая диагностика: теория и практика: моногр. Ростов н/Д: Изд-во РСЭИ, 2009. 282 с.

6. Mathematical modeling of corporate network tolerance troubleshooting methods / A.A. Petrov, D.N. Savinskaya, E.A. Minina, L.K. Dunsкая // *Modern Economics: Problems and Solutions*. 2020. No. 12 (132). P. 35–45. DOI: 10.17308/meps.2020.12/2488
7. Саханский Ю.В., Гуриева Л.К. Применение экономико-математических методов в диагностике устойчивости бизнеса. *Аудиторские ведомости*. 2021. № 2. С. 220–223.
8. Шушерина О.А., Логунова О.В. Методы математической статистики при профессиональной диагностике в дополнительном образовании взрослых // *Профессиональное образование в России и за рубежом*. 2016. № 4 (24). С. 143–150.
9. Лялюк А.В. Моделирование и диагностика рисков образовательной среды на основе математических методов // *Проблемы современного образования*. 2019. № 2. С. 198–204.
10. Зеленова Л.А., Павлюченко Е.А., Щерба В.Е. Применение метода математического моделирования для технической диагностики компрессоров объемного действия // *Россия молодая: передовые технологии – в промышленность*. 2013. № 1. С. 038–039.
11. Математические методы в диагностике заболеваний предстательной железы / С.Н. Шамраев, И.А. Бабюк, Е.И. Евтушенко и др. // *Вестник гигиены и эпидемиологии*. 2019. Т. 23, № 1. С. 12–15.
12. Уздин Д.З. О некоторых методах математической диагностики: теории распознавания состояний. М.: МАКС Пресс, 2008. 107 с.
13. Мазуров В.Д. Линейная оптимизация и моделирование. Свердловск: Уральский государственный университет им. А.М. Горького, 1986. 68 с.
14. Mazurov V.D., Krivonogov A.I., Kazantsev V.S. Solving of optimization and identification problems by the committee methods // *Pattern Recognition*. 1987. Vol. 20, no. 4. P. 371–378. DOI: 10.1016/0031-3203(87)90061-6
15. Еремин И.И., Мазуров В.Д. Нестационарные процессы математического программирования. М.: Наука, 1979. 287 с.
16. Кривоногов А.И. Некоторые модификации комитетных алгоритмов в распознавании образов // *Методы математического программирования и приложения*. Свердловск: ИММ УНЦ АН СССР, 1979. Вып. 27. С. 49–55.

References

1. Krotkov E.A. Diagnostics as universal form of scientific cognition (epistemological analysis). *Voprosy filosofii*. 2014;(3):85–94. (In Russ.)
2. Kochetov A.I. *Pedagogicheskaya diagnostika* [Pedagogical diagnostics]. Slavyansk-na-Kubani: Slavyansk branch Armavir State Pedagogical Institute; 1998. (In Russ.)
3. Slobodchikov V.I. Theory and diagnostics development in the context of psychological anthropology. *Psikhologiya obucheniya*. 2014;(1):4–34. (In Russ.)
4. Shcherbina V.V. *Sredstva sotsiologicheskoy diagnostiki v sisteme upravleniya* [Means of sociological diagnostics in the management system]. Moscow: Moscow University Publ.; 1993. 116 p. (In Russ.)
5. Grigan A.M. *Upravlencheskaya diagnostika: teoriya i praktika: monografiya* [Management diagnostics: theory and practice: Monograph]. Rostov-na-Donu: Rostov Socio-Economic Institute Publ., 2009. 282 p. (In Russ.)
6. Petrov A.A., Savinskaya D.N., Minina E.A., Dunsкая L.K. Mathematical modeling of corporate network tolerance troubleshooting methods. *Modern Economics: Problems and Solutions*. 2020;12(132):35–45. DOI: 10.17308/meps.2020.12/2488
7. Sakhansky Yu.V., Gurieva L.K. Possibilities of economic and mathematical methods in diagnosing business sustainability. *Auditorskie ведомости*. 2021;(2):220–223. (In Russ.)
8. Shusherina O.A., Logunova O.V. Mathematical statistics methods in professional diagnostics in adult education. *Professional Education in Russia and Abroad*. 2016;4(24):143–150. (In Russ.)
9. Lyaluk A.V. Modeling and diagnostics of educational environment risks based on mathematical methods. *Problemy sovremennogo obrazovaniya*. 2019;(2):198–204. (In Russ.)
10. Zelenova L.A., Pavlyuchenko E.A., Shcherba V.E. [Application of mathematical modeling method for technical diagnostics of volumetric compressors]. *Rossiia molodaya: peredovye tekhnologii – v promyshlennost'*. 2013;(1):038–039. (In Russ.)

11. Shamraev S.N., Babyuk I.A., Evtushenko E.I. et al. [Mathematical methods in the diagnosis of prostate diseases]. *Vestnik gigieny i epidemiologii*. 2019;23(1):12–15. (In Russ.)
12. Uzdin D.Z. *O nekotorykh metodakh matematicheskoy diagnostiki: teorii raspoznavaniya sostoyaniy* [About some methods of mathematical diagnostics: theories of state recognition]. Moscow: MAKS Press; 2008. 107 p.
13. Mazurov V.D. *Lineynaya optimizatsiya i modelirovanie* [Linear optimization and modeling]. Sverdlovsk: Ural State University named after A.M. Gorky; 1986. 68 p. (In Russ.)
14. Mazurov V.D., Krivonogov A.I., Kazantsev V.S. Solving of optimization and identification problems by the committee methods. *Pattern Recognition*. 1987;20(4):371–378. DOI: 10.1016/0031-3203(87)90061-6
15. Eremin I.I., Mazurov V.D. *Nestatsionarnye protsessy matematicheskogo programmirovaniya* [Nonstationary processes of mathematical programming]. Moscow: Nauka; 1979. 287 p. (In Russ.)
16. Krivonogov A.I. [Some modifications of committee algorithms in pattern recognition]. In: *Metody matematicheskogo programmirovaniya i prilozheniya*. Sverdlovsk; 1979. Iss. 27. P. 49–55. (In Russ.)

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; loginovskiiiov@susu.ru.

Гилёв Денис Викторович, канд. техн. наук, доц. кафедры экономики, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; denis.gilev@urfu.ru.

Information about the authors

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

Denis V. Gilev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Economics, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; denis.gilev@urfu.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 04.07.2022
The article was submitted 04.07.2022

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ НАСТАВНИЧЕСТВА В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

О.С. Перевалова, nilga.os_vrn@mail.ru

С.А. Баркалов, bsa610@yandex.ru

Н.А. Балашова, butyrinanatalya@gmail.com

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. В данной статье рассматривается механизм стимулирования труда работников, выполняющих функции наставника в организационных системах, которые осуществляют проектную деятельность. Как правило, работник, выполняющий функции наставника, отвлекается от своей основной деятельности и, следовательно, теряет часть дохода, который он потенциально мог бы получить, если бы был задействован в реализации проекта на сто процентов. Этот факт может демотивировать работника выполнять функции наставника полноценно и качественно. **Цель исследования.** Исходя из сказанного выше, целью работы является разработка такого механизма стимулирования труда наставника, участвующего в реализации проекта или работающего на предприятии, осуществляющем проектную деятельность, который повысит заинтересованность наставника выполнять свои функции качественно. **Материалы и методы.** В представленной работе будет рассматриваться ситуация, в которой учениками наставника являются студенты, проходящие практическую подготовку на предприятиях или изучающие учебные дисциплины, практические занятия которых проводятся на базе предприятия, с которым заключен соответствующий договор. Главной задачей наставника является освоение студентами профессиональных компетенций, предусмотренных в Основной профессиональной образовательной программе вуза. Заметим, что осуществлять процесс наставничества только в свободное от работы время мастер не может, так как отличительной особенностью наставничества является то, что обучение происходит в процессе непосредственной работы (на рабочем месте), что делает эту процедуру эффективной в плане освоения именно практических навыков. А это, в свою очередь, является одним из основных плюсов наставничества. **Результаты.** Для компенсации дохода, который наставник «теряет», отвлекаясь от своей основной деятельности, предлагается ввести следующую систему надбавок. Во-первых, весь период наставничества он будет получать компенсирующую надбавку. Она или будет декларирована руководством, или равняться заработной плате, которую наставник будет получать от вуза. Этот вариант доступен в случае, если между работником, осуществляющим функции наставника, и вузом заключен трудовой договор или гражданско-правовой договор. Во-вторых, после завершения процедуры наставничества наставник получит стимулирующую надбавку. Ее величина будет определяться качеством обучения учеников, то есть их оценками, полученными по каждой из компетенций, которыми они должны были овладеть после обучения. **Заключение.** Из сказанного выше следует, что наставник весь период наставничества будет получать компенсирующую его дополнительные затраты времени надбавку, а по завершении процедуры наставничества – стимулирующую надбавку, зависящую от качества выполнения своих функций. Предполагается, что первая должна подпитывать его заинтересованность весь период наставничества к выполнению своих обязанностей наиболее качественно с целью получить по завершении процедуры наставничества как можно большую стимулирующую надбавку.

Ключевые слова: наставничество, оценка учеников, стимулирование, компетенции

Для цитирования: Перевалова О.С., Баркалов С.А., Балашова Н.А. Оптимизация процедуры наставничества в организационных системах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 85–95. DOI: 10.14529/ctcr220409

Original article
DOI: 10.14529/ctcr220409

OPTIMIZATION OF THE MENTORING PROCEDURE IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS

O.S. Perevalova, nilga.os_vrn@mail.ru

S.A. Barkalov, bsa610@yandex.ru

N.A. Balashova, butyrinanatalya@gmail.com

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. This article discusses the mechanism for stimulating the work of workers performing the functions of a mentor in organizational systems that carry out project activities. As a rule, an employee, acting as a mentor, is distracted from his main activity and, consequently, loses part of the income that he could potentially receive if he was involved in the implementation of the project for one hundred percent. This fact can demotivate an employee, perform the functions of a mentor fully and efficiently. **Aim.** Based on the foregoing, the aim of the work is to develop such a mechanism for stimulating the work of a mentor participating in the implementation of the project or working at an enterprise carrying out project activities, which will increase the interest of the mentor to perform their functions efficiently. **Materials and methods.** The presented work will consider a situation in which the mentor's students are students undergoing practical training at enterprises, or studying academic disciplines, practical classes, which are held on the basis of an enterprise with which an appropriate contract has been concluded. The main task of the mentor is the development by students of the professional competencies provided for in the Basic professional educational program of the university. Note that the master cannot carry out the mentoring process only in his free time, since the distinguishing feature of mentoring is that training takes place in the process of direct work (at the workplace), which makes this procedure effective in terms of mastering practical skills. And this, in turn, is one of the main advantages of mentoring. **Results.** To compensate for the income that the mentor "loses" by being distracted from his main activity, it is proposed to introduce the following system of bonuses. Firstly, he will receive a compensating allowance for the entire period of mentorship. It will either be declared by the management, or equal to the salary that the mentor will receive from the university. This option is available if an employment contract or a civil law contract has been concluded between the employee performing the functions of a mentor and universities. Secondly, after the completion of the mentoring procedure, the mentor will receive an incentive bonus. Its value will be determined by the quality of students' learning, that is, their grades obtained for each of the competencies that they should have mastered after training. **Conclusion.** From the foregoing, it follows that the mentor will receive a bonus compensating for his additional time spent during the entire period of mentoring, and upon completion of the mentoring procedure, an incentive bonus depending on the quality of the performance of his functions. It is assumed that the first should feed his interest during the entire period of mentoring to perform his duties in the most qualitative way in order to receive, upon completion of the mentoring procedure, the largest possible incentive bonus.

Keywords: mentoring, student assessment, stimulation, competencies

For citation: Perevalova O.S., Barkalov S.A., Balashova N.A. Optimization of the mentoring procedure in organizational systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2022;22(4):85–95. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220409

Введение

Необходимость возрождения института наставничества была обозначена Президентом РФ в 2013 году, что повлекло становление и развитие наставничества в современных корпоративной и образовательной средах. За прошедший период сформировалось мнение, что наставничество может являться актуальным инструментом для повышения качества образовательных услуг, механизмом создания эффективных социальных лифтов и одним из инструментов, который позволит ускорить «технологический рывок» в российской экономике.

Наставничество как технология адаптации и обучения характеризуется тем, что наставник, являясь штатным сотрудником организации, обычно выполняет весь круг задач по ве-

дению своих подопечных в организацию и их обучению без освобождения от основной работы [1, 2].

Инструмент наставничества знаком нам и близок. Он отражает давнюю традицию работы с начинающим и новым персоналом и всегда (в разной степени) использовался на российских (советских) предприятиях. Но на современных предприятиях эта технология несколько трансформировалась, она была скрещена с иностранными аналогами и приобрела различные формы, которые в идеале должны затрагивать весь персонал предприятия. Сегодня наставничество помимо функций адаптации и обучения новичков, то есть персонала, только что получившего работу на предприятии, должно обучать или развивать различные категории людей, при этом преследуя различные цели (см. таблицу).

Объекты и цели современного наставничества
Objects and goals of modern mentoring

№ п/п	Объект наставничества	Цель наставничества
1	Школьники (старшеклассники)	Профориентация
2	Студенты, проходящие практическую подготовку или изучающие учебные дисциплины, практические занятия которых проводятся на базе предприятия	Углубление профессионального образования (овладение профессиональными компетенциями) и подготовка к возможной будущей профессиональной специализации
3	Новички (новый персонал)	Адаптация в компании, ускоренное освоение норм и требований, вхождение в полноценный рабочий режим. Передача профессионального опыта
4	Руководители	Подготовка к развитию управленческой карьеры, переход на более высокие уровни управления

Также не стоит забыть об инвалидах и лицах с ОВЗ. Они могут входить в любую из представленных выше категорий и особенно будут нуждаться в сопровождении при встрече с чем-то новым (местом работы, учебы, должностью или другим). Поэтому в рамках инклюзивного образования наставничество должно занимать особое место.

Из сказанного выше следует, что целью наставника является восполнение того или иного образовательного дефицита у объектов наставничества – учеников. Поэтому на плечи наставника ложится ответственная, почетная и, в свою очередь, обременительная обязанность учителя. Руководству предприятия, организаторам процедуры наставничества нужно помнить об этом при ее внедрении и организовать ее таким образом, чтобы наставник был заинтересованным лицом, а не просто исполнителем, обремененным грузом дополнительных обязанностей.

1. Цели оптимизации процедуры наставничества

В представленной работе будет рассматриваться ситуация, в которой наставник участвует в реализации проекта(ов) или работает на предприятии, осуществляющем проектную деятельность [3], а его учеником(ами) являются студенты, проходящие практическую подготовку на предприятиях или изучающие учебные дисциплины, практические занятия которых проводятся на базе предприятия, с которым заключен соответствующий договор. Главной задачей наставника является освоение студентами профессиональных компетенций, предусмотренных в Основной профессиональной образовательной программе вуза [4]. Будем называть наставников от организации мастерами, опираясь при этом на суть следующего определения, представленного в Вики-словаре (<https://ru.wiktionary.org/>).

Мастер – это преподаватель, работающий в профессиональном училище и обучающий учащихся применяемым на практике навыкам в какой-либо отрасли или профессии.

Итак, мастер для осуществления процедуры наставничества должен отвлекаться от выполнения своих основных обязанностей, то есть от работы над проектом(ами), поэтому он теряет часть своего дохода, зависящего от объемов выполненной им работы или от его трудового

вклада (как отмечалось выше, рассматривается ситуация, в которой мастер задействован в работе над проектами).

Заметим, что осуществлять процесс наставничества только в свободное от работы время мастер не может, так как отличительной особенностью наставничества является то, что обучение происходит в процессе непосредственной работы (на рабочем месте), что делает эту процедуру эффективной в плане освоения именно практических навыков. А это, в свою очередь, является одним из основных плюсов наставничества [5].

Следовательно, для компенсации «потерянного» дохода вследствие отвлечения мастера от его основной работы предлагается вариант расчета «потерянного» дохода, суть которого заключается в следующем.

Необходимо определить долю времени, которое мастер тратит на процесс наставничества, и оплатить ему это время [6]. Доля времени должна быть регламентирована, так как при применении к процедуре наставничества научного подхода – это необходимый параметр, который регламентируется организаторами этого процесса (руководством предприятия, сотрудником подразделения по управлению человеческими ресурсами или другим уполномоченным лицом) путем составления программы наставничества [1].

Итак, цель статьи – разработка механизма стимулирования труда мастера, участвующего в реализации проекта(ов) или работающего на предприятии, осуществляющем проектную деятельность.

2. Модель стимулирования труда мастера

Рассмотрим следующую задачу. Если знаем долю времени, которое мастер отвлечен от выполнения своих непосредственных обязанностей, то, исходя из предположения, что потерянный доход напрямую связан со временем отвлечения мастера от его основной работы, можно найти величину дохода, которую он теряет:

$$Q_l = Q \cdot d, \quad (1)$$

где Q_l – величина «потерянного» мастером дохода за определенный месяц;

Q – величина дохода мастера за определенный месяц (заработная плата мастера);

d – доля времени, которое мастер отвлечен от выполнения своих функциональных обязанностей.

Стоит отметить, что в величину Q может входить не только заработная плата. В нее могут быть включены потенциально возможные премии или другие виды дохода мастера, доли от которых он теряет вследствие участия в процессе наставничества. Следовательно, величина Q задается по согласованию с руководством предприятия.

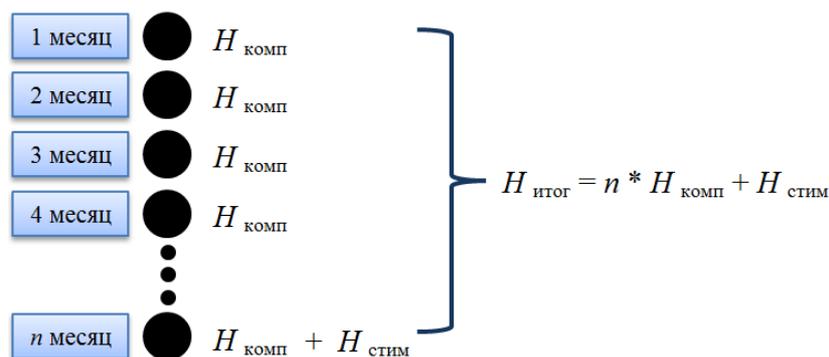
Рассмотрим варианты определения доли d :

1) она задается организаторами процедуры наставничества в программе наставничества;

2) определяется часами занятий, которые наставник должен отработать по учебному плану вуза. Этот вариант доступен в случае, если между мастером и вузом заключен трудовой договор или гражданско-правовой договор.

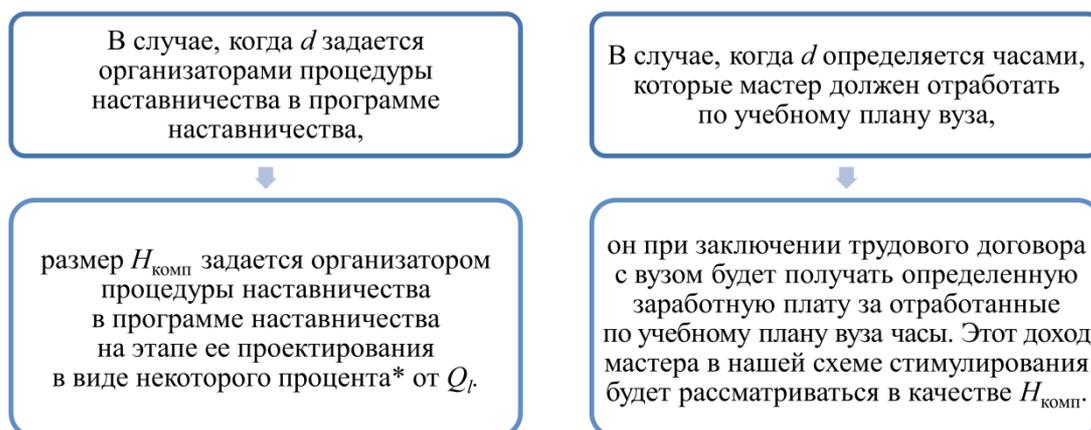
Для налаживания эффективной процедуры наставничества на предприятии должна быть внедрена система компенсации потерянного дохода, то есть система стимулирования труда мастеров [7, 8]. Исходя из этого утверждения, предлагается ввести для мастеров надбавку, а ее размер сделать динамичным, так как величина надбавки будет зависеть от результатов процедуры наставничества, которые будут оцениваться определенным образом [9]. Рассмотрим схему получения надбавки мастером (рис. 1).

Варианты расчета компенсирующей надбавки $H_{\text{комп}}$ представлены на рис. 2.



где $H_{\text{итог}}$ – итоговая премия;
 $H_{\text{комп}}$ – компенсирующая надбавка (1-го типа);
 $H_{\text{стим}}$ – стимулирующая надбавка (2-го типа);
 n – период наставничества, в мес.

Рис. 1. Схема получения надбавок мастером [9]
 Fig. 1. Scheme for receiving allowances by the master [9]



* Для повышения эффективности механизма стимулирования рекомендуется задавать процент выплат, равным 100 %.

Рис. 2. Варианты определения компенсирующей надбавки
 Fig. 2. Options for determining the compensating allowance

Теперь рассмотрим процесс определения стимулирующей части надбавки мастеров $H_{\text{стим}}$. Заметим, что для всех вариантов, представленных на рис. 2, она будет одинаковой.

3. Процедура расчета стимулирующей надбавки мастера

Этап 1. Создание идеального профиля должности, которой обучается ученик. Профиль должности определяется набором компетенций, которыми необходимо овладеть, чтобы обучиться соответствующей должности [10].

Итак,

$$P_I = \{p_{Ij}\}, j \in \overline{1; m}, \quad (2)$$

где P_I – идеальный профиль должности;

p_{Ij} – оценка соответствующей компетенции;

m – количество компетенций в профиле должности.

Осуществлять оценку компетенций предполагается по четырехбалльной системе, так как именно она используется в вузах.

Визуально профиль должности должен быть представлен в виде лепестковой диаграммы, на лепестковых осях которой должны быть нанесены значения, соответствующие p_{Ij} .

Этап 2. Обучение ученика (процедура наставничества). Этот этап длительный и наиболее важный с точки зрения процедуры наставничества [6]. Но в данном случае на нем заострять внимание не будем, так как сам процесс обучения уже являлся объектом исследования в работах [6, 9, 11, 12].

Этап 3. Оценка ученика. На этом этапе предполагается составление профиля ученика, то есть оценка степени овладения им каждой компетенции, входящей в профиль должности [13, 14].

Итак,

$$P_L = \{p_{Lj}\}, j \in \overline{1; m}, \quad (3)$$

где P_L – профиль ученика;

p_{Lj} – оценка соответствующей компетенции, входящей в профиль должности.

Визуализация примера идеального профиля должности и профиля ученика представлена на рис. 3.



Рис. 3. Диаграмма идеального профиля должности и профиля ученика
Fig. 3. Diagram of the Ideal Job Profile and Apprentice Profile

Этап 4. Расчет стимулирующей надбавки $H_{\text{стим}}$:

$$H_{\text{стим}} = w \cdot \sum_{e=1}^n Q_{le}; \quad (4)$$

$$w = S_{\text{и}} / S_{\text{у}}, \quad (5)$$

где w – доля, которую составляет площадь фигуры 2 от фигуры 1;

$\sum_{e=1}^n Q_{le}$ – величина «потерянного» дохода за n месяцев;

n – продолжительность периода наставничества;

$S_{\text{и}}$ – площадь фигуры 1 (см. рис. 3), ограничивающей идеальный профиль профессии;

$S_{\text{у}}$ – площадь фигуры 2 (см. рис. 3), ограничивающей профиль ученика.

Площадь фигур 1 и 2 будет определяться как сумма площадей треугольников, из которых они состоят (рис. 4, 5).

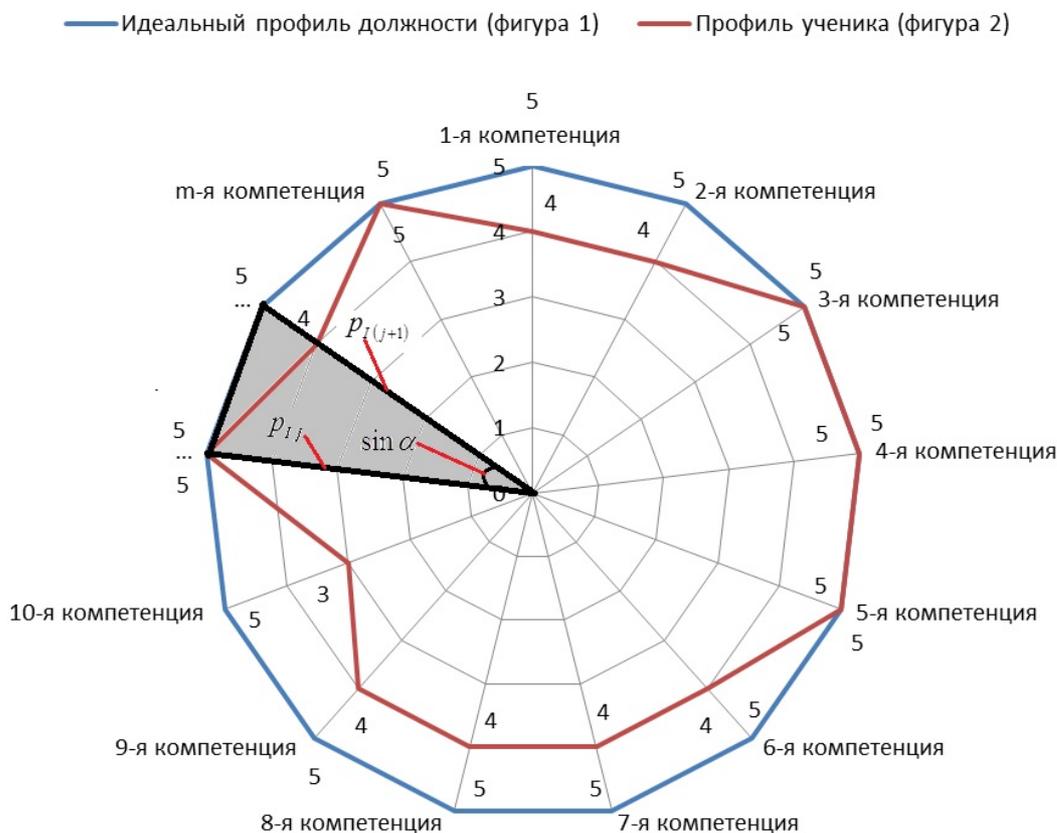


Рис. 4. Структура фигуры 1 идеального профиля должности
Fig. 4. The structure of figure 1 of the ideal job profile

Площадь фигуры 1 определим по формуле (6)

$$S_{и} = \sum_{i=1}^m S_{иi} = \frac{1}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \left(\sum_{i=1}^{m-1} p_{Ij} \cdot p_{I(j+1)} + p_{Im} \cdot p_{I1} \right); \quad (6)$$

$$S_{иi} = \frac{1}{2} \cdot p_{Ij} \cdot p_{I(j+1)} \cdot \sin \alpha, \quad (7)$$

где $S_{иi}$ – площадь i -го треугольника, из которых состоит фигура 1;

p_{Ij} – сторона треугольника;

$p_{Ij}, p_{I(j+1)}$ – это смежные стороны треугольника. Их общая точка является центром лепестковой диаграммы, визуализирующей идеальный профиль должности;

α – угол между сторонами $p_{Ij}, p_{I(j+1)}$ треугольника.

Стоит отметить, что во всех треугольниках углы между смежными сторонами, общей точкой которых является центр лепестковой диаграммы, равны и находятся по формуле

$$\alpha = 360/m. \quad (8)$$

Преобразуем формулу (6), используя (8), и получим

$$S_{и} = \sum_{i=1}^m S_{иi} = \frac{1}{2} \cdot \sin \left(\frac{360}{m} \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{m-1} p_{Ij} \cdot p_{I(j+1)} + p_{Im} \cdot p_{I1} \right). \quad (9)$$

Заметим, что, исходя из формулы (7), на площадь треугольника влияет длина смежных сторон и угол между ними. Все эти углы, как отмечалось выше, равны, следовательно, решающее влияние на величину площади оказывает длина смежных сторон. Эта длина в свою очередь соответствует оценкам компетенций идеального профиля должности (2).

Теперь аналогичным способом с учетом всех указанных выше замечаний определим площадь фигуры 2 (см. рис. 5) по формуле

$$S_y = \sum_{i=1}^m S_{yi} = \frac{1}{2} \cdot \sin\left(\frac{360}{m}\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{m-1} p_{Lj} \cdot p_{L(j+1)} + p_{Lm} \cdot p_{L1}\right); \quad (10)$$

$$S_{yi} = \frac{1}{2} \cdot p_{Lj} \cdot p_{L(j+1)} \cdot \sin \alpha, \quad (11)$$

где S_{yi} – площадь i -го треугольника, из которых состоит фигура 2;

p_{Lj} – сторона треугольника;

$p_{Lj}, p_{L(j+1)}$ – это смежные стороны треугольника. Их общая точка является центром лепестковой диаграммы, визуализирующей профиль ученика.

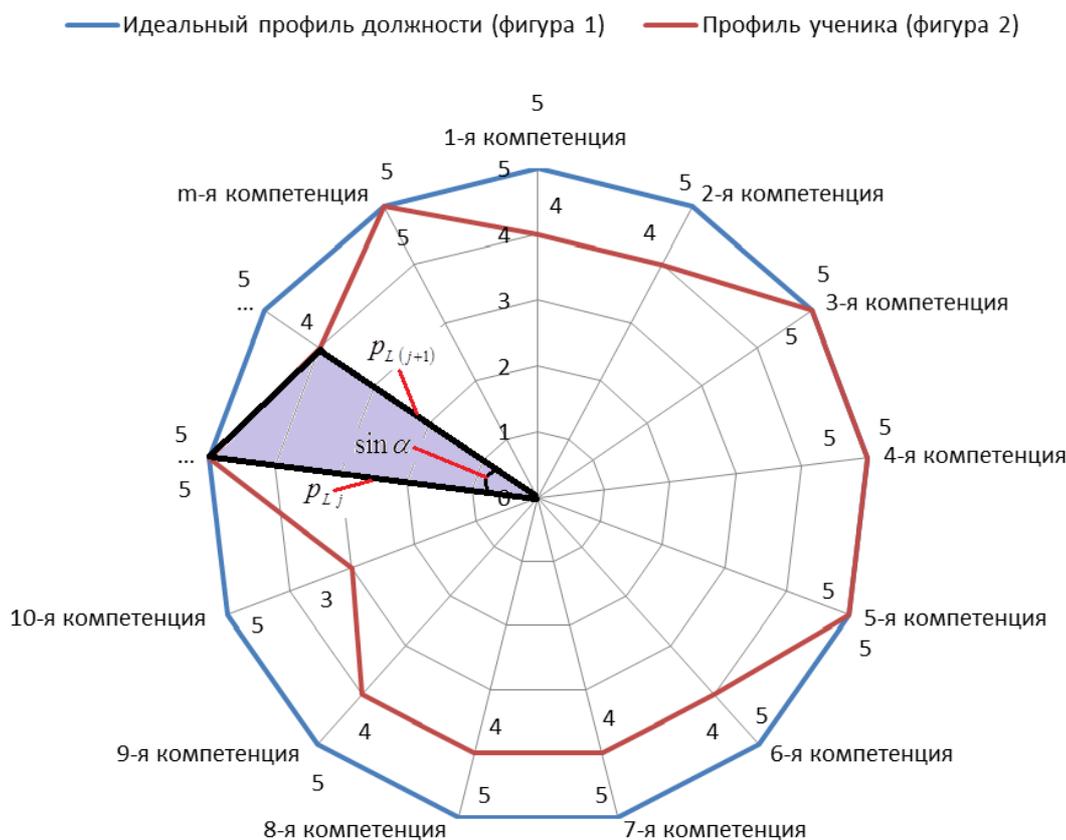


Рис. 5. Структура фигуры 2 профиля ученика
Fig. 5. The structure of the figure 2 student profiles

Вернемся к формуле (5). Заметим, что величина w будет зависеть от числителя формулы (5), следовательно, она напрямую зависит от оценок компетенций ученика p_{Lj} , которые он получит по итогам обучения, то есть процедуры наставничества. Отсюда следует, что величина w зависит от степени овладения учеником необходимыми компетенциями, а это, в свою очередь, напрямую связано с качеством обучения, то есть с качеством выполняемых мастером функций в процессе наставничества.

Из всего этого следует, что чем лучше ученик овладел профессией, тем выше будет $H_{\text{стим}}$. Если ученик получит по каждой из m компетенций высшую оценку, то мастер получит стопроцентную компенсацию «потерянного» дохода. Если ученик овладеет профессией лишь на $(w \cdot 100)\%$, то он получит w доли «потерянного» дохода. Следовательно, в интересах мастера проводить процедуру наставничества как можно качественнее.

Система стимулирования мастера, представленная выше, характерна для случая, когда мастер имеет одного ученика. Эта ситуация является идеальной с точки зрения качества обучения и величины трудозатрат мастера, но достаточно редкой. Наиболее типичным будет случай, когда мастер является наставником некоторой группы учеников. Тогда механизм стимулирования нужно скорректировать. Вместо профиля ученика будет использоваться профиль группы учеников P_G :

$$P_G = \{p_{Gj}\}, j \in \overline{1; m}, \quad (12)$$

где p_{Gj} – средняя оценка группы учеников по j -й компетенции.

Она будет рассчитываться по формуле

$$p_{Gj} = \frac{\sum_{k=1}^4 o_k \cdot f_{jk}}{\sum_{f=1}^4 f_{jk}}, \quad (13)$$

где o_k – оценка (балл), полученный учеником, $o_k \in \{5; 4; 3; 2\}$ (напомним, что используется четырехбалльная система оценки);

f_{jk} – количество учеников группы, получивших определенную оценку по j -й компетенции.

Тогда площадь фигуры, визуализирующей профиль группы учеников S_r , будет определяться следующим образом:

$$S_r = \sum_{i=1}^m S_{ri} = \frac{1}{2} \cdot \sin\left(\frac{360}{m}\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{m-1} p_{Gj} \cdot p_{G(j+1)} + p_{Gm} \cdot p_{G1}\right), \quad (14)$$

в остальном механизм стимулирования останется неизменным.

Заключение

Наставничество предполагает обучение ученика непосредственно на рабочем месте без отрыва от производства и с минимальными для организации, по сравнению с другими методами, финансовыми затратами [15] и, что немаловажно, обеспечивает постоянную обратную связь между мастером и учеником, что позволяет, во-первых, ученику не потерять нить значимости процесса обучения, а во-вторых, постоянно стимулировать его ответственность непосредственным присутствием «учителя», так как мастер хотя и может находиться на некотором расстоянии, но в пределах одной организации.

Для обеспечения качества процедуры наставничества ее участники должны быть в ней заинтересованы. Ученик является основным лицом, в интересах которого проводится процедура наставничества, поэтому его интерес очевиден. Целью же данной работы являлась разработка модели повышения (пробуждения) заинтересованности мастера.

Мастер весь период наставничества будет получать компенсирующую его дополнительные затраты времени надбавку, а по завершении процедуры наставничества – стимулирующую надбавку, зависящую от качества выполнения им своих функций. Предполагается, что первая надбавка должна подпитывать его заинтересованность весь период наставничества к выполнению своих обязанностей наиболее качественно с целью получить по завершении процедуры наставничества как можно большую стимулирующую надбавку.

Список литературы

1. Перевалова О.С., Шевченко Л.В., Батракова Д.Н. Наставничество – инструмент профессиональной и социально-психологической адаптации кадров в организации // Проектное управление в строительстве. 2020. № 1 (18). С. 114–123.
2. Базаров Т.Ю. Психология управления персоналом: учеб. и практикум для академ. бакалавриата. М.: Юрайт, 2016. 182 с.
3. Выбор методов оценки при формировании кадрового состава проектных команд / Ю.В. Бондаренко, И.С. Никитин, Н.Ю. Калинина, А.М. Ходунов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, № 2. С. 116–124. DOI: 10.14529/ctcr200211

4. Давыдова Т.Е., Баркалов С.А. Человеческий потенциал в стратегии развития региона: мотивация деятельности субъектов вузов // Экономика и менеджмент систем управления. 2019. № 4 (34). С. 32–39.
5. Основы методологии научных социально-экономических исследований: учеб.-метод. пособие / С.А. Баркалов, Л.А. Мажарова, Л.П. Мышовская, О.С. Перевалова. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2019. 214 с.
6. Модель закрепления ученика за наставником в системе обучения персонала организации / О.С. Перевалова, С.А. Баркалов, Н.Ю. Калинина, Д.Н. Батракова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2021. Т. 21, № 2. С. 92–103. DOI: 10.14529/ctcr210209
7. Перевалова О.С., Саратова Ф.В. Алгоритм стимулирования персонала на предприятиях с различными типами организационных культур // Проектное управление в строительстве. 2020. № 3 (20). С. 115–126.
8. Перевалова О.С., Бондарь И.В. Проблемы мотивации персонала на российских предприятиях // Проектное управление в строительстве. 2021. № 3 (24). С. 78–83.
9. Модель повышения эффективности процесса обучения персонала на рабочем месте / О.С. Перевалова, С.А. Баркалов, Н.Ю. Калинина, Д.Н. Батракова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2021. Т. 21, № 3. С. 100–112. DOI: 10.14529/ctcr210310
10. Перевалова О.С., Бондарь И.В. Проектирование должностных моделей в системе государственного и муниципального управления // Проектное управление в строительстве. 2021. № 2 (23). С. 120–130.
11. Simulation of the Workplace Personnel Training Organization Process / N. Balashova, P. Kurochka, O. Perevalova, L. Shevchenko // 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA; 2021. P. 405–409.
12. Баутина Е.В., Перевалова О.С., Батракова Д.Н. Алгоритм внедрения системы наставничества в организации // Проектное управление в строительстве. 2020. № 3 (20). С. 85–91.
13. Бондаренко Ю.В., Свиридова Т.А., Бондаренко О.В. Двухкритериальная задача формирования пакета тестов для отбора персонала // Управление строительством. 2019. № 3 (16). С. 82–87.
14. Разработка практико-ориентированного алгоритма формирования интегральной оценки компетентности выпускников образовательных направлений / Т.В. Азарнова, Т.Н. Гоголева, А.Г. Гусева, А.С. Демидова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2018. № 4. С. 119–131.
15. Горелов Н.А., Круглов Д.В., Мельников О.Н. Управление человеческими ресурсами: современный подход: учеб. и практикум для академ. бакалавриата. М.: Юрайт; 2016. 270 с.

References

1. Perevalova O.S., Shevchenko L.V., Batrakov D.N. Mentality –a tool for professional and socio-psychological adaptation of personnel in the organization. *Proyektnoye upravleniye v stroitel'stve*. 2020;1(18):114–123. (In Russ.)
2. Bazarov T.Yu. *Psikhologiya upravleniya personalom: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata* [Psychology of personnel management: textbook and workshop for academic undergraduate]. Moscow: Yurayt Publ.; 2016. 182 p. (In Russ.)
3. Bondarenko Yu.V., Nikitin I.S., Kalinina N.Yu., Khodunov A.M. Selection of Evaluation Methods when Forming Personnel of Project Teams. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2020;20(2):116–124. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200211
4. Davydova T.E., Barkalov S.A. [Human potential in the development strategy of the region: motivation of the activities of the subjects of universities]. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya*. 2019;4(34):32–39. (In Russ.)
5. Barkalov S.A., Mazharova L.A., Myshovskaya L.P., Perevalova O.S. *Osnovy metodologii nauchnykh sotsial'no-ekonomicheskikh issledovaniy: uchebno-metodicheskoye posobiye* [Fundamentals of the methodology of scientific socio-economic research: teaching aid]. Voronezh: VSTU Publ.; 2019. 214 p. (In Russ.)

6. Perevalova O.S., Barkalov S.A., Kalinina N.Yu., Batrakova D.N. Model for Assigning a Pupil to a Mentor in the Staff Training System of the Organization. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(2):92–103. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210209
7. Perevalova O.S., Saratova F.V. Algorithms for staff incentives in enterprises with different types of organizational cultures. *Proyektnoye upravleniye v stroitel'stve*. 2020;3(20):115–126. (In Russ.)
8. Perevalova O.S., Bondar' I.V. Problems of personnel motivation at russian enterprises. *Proyektnoye upravleniye v stroitel'stve*. 2021;3(24):78–83. (In Russ.)
9. Perevalova O.S., Barkalov S.A., Kalinina N.Yu., Batrakova D.N. A Model for the Enhancement of Effectiveness of On-the-Job Training Process. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(3):100–112. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210310
10. Perevalova O.S., Bondar' I.V. Designing office models in the government and municipal governance system. *Proyektnoye upravleniye v stroitel'stve*. 2021;2(23):120–130. (In Russ.)
11. Balashova N., Kurochka P., Perevalova O., Shevchenko L. Simulation of the Workplace Personnel Training Organization Process. In: *3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA*; 2021. P. 405–409.
12. Bautina E.V., Perevalova O.S., Batrakov D.N. Algorithm for implementing the mentoring system in the organization. *Proyektnoye upravleniye v stroitel'stve*. 2020;3(20):85–91. (In Russ.)
13. Bondarenko Yu.V., Sviridova T.A., Bondarenko O.V. Two-criteria problem of forming of the test package for selection of personnel. *Upravlenie stroitel'stvom*. 2019;3(16):82–87. (In Russ.)
14. Azarnova T.V., Gogoleva T.N., Guseva A.G., Demidova A.S. Development of a practice-oriented algorithm for the formation of an integrated assessment of the competence of graduates of educational areas. *Proceedings of Voronezh state university. Series: Systems analysis and information technologies*. 2018;4(4):119–131. (In Russ.)
15. Gorelov N.A., Kruglov D.V., Melnikov O.N. *Upravleniye chelovecheskimi resursami: sovremennyy podkhod: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata* [Human Resource Management: A Modern Approach: A Textbook and Workshop for Academic Bachelor's Degree]. Moscow, Yurayt Publ.; 2016. 270 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Перевалова Ольга Сергеевна, канд. техн. наук, доц. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; nilga.os_vrn@mail.ru.

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; bsa610@yandex.ru.

Балашова Наталья Андреевна, аспирант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; butyrinanatalya@gmail.com.

Information about the authors

Olga S. Perevalova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; nilga.os_vrn@mail.ru.

Sergey A. Barkalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; bsa610@yandex.ru.

Natalia A. Balashova, Postgraduate Student of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; butyrinanatalya@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 15.09.2022

The article was submitted 15.09.2022

MODEL OF PROJECT MANAGEMENT IN THE DIGITAL EDUCATIONAL ENVIRONMENT OF THE UNIVERSITY

Yu.V. Podpovetnaya^{1, 2}, y-u-l-i-a-v-a-l@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1673-7720>
A.M. Najmiddinov³, asadullo-tj@mail.ru
L.Yu. Ovsyanitskaya⁴, larovs@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6598-9110>
A.D. Podpovetny¹, ruter98@mail.ru

¹ *Financial University under the Government of the Russian Federation (Ural Branch), Chelyabinsk, Russia*

² *The South Ural University of Technology, Chelyabinsk, Russia*

³ *The Tajik State University of Finance and Economics, Dushanbe, Republic of Tajikistan*

⁴ *International Institute of Design and Service, Chelyabinsk, Russia*

Abstract. The paper considers the main aspects of project management in a digital educational environment. Particular attention is paid to solving the problem of improving the theoretical, methodological and technological foundations of effective management of project activities of students in the digital educational environment of the university. **The purpose of the study** is to develop and theoretically substantiate a model for managing students project activities in the digital educational environment of the university. **Materials and methods.** The solution of this problem in the text of the article was carried out on the basis of a structural analysis of project activities, as a result of which the structural components and functionality were determined, an analysis was carried out for the compliance of the existing system with functional requirements, measures for the effective management of students' project activities were developed and substantiated. Based on the study of the principles of building a digital educational environment, an analysis and modeling of the project management process was carried out. The structure of the digital educational environment of the university is revealed, presented as an open set of information systems designed to provide various tasks of the educational process. In order to ensure effective management of project activities of students, an author's model of project management in the digital educational environment of the university has been developed. The internal structure of the model is provided by theoretical-methodological, perspective-target, content-semantic, organizational-activity and integrative-evaluative blocks. The technology for implementing the model for managing students' project activities in the digital educational environment of the university, developed in the logical unity of content, procedural and organizational characteristics, is presented. **Results.** Based on the analysis of scientific and methodological literature, the practice of higher education, the current state of the problem of management of project activities of students is revealed. The features of the digital educational environment of the university and its possibilities in the development of the project culture of students are determined. A model for managing project activities of students has been developed and substantiated, including methodological foundations, conceptual and categorical apparatus, theoretical basis and content and semantic content. The technology of implementation of the model of management of project activities of students in the digital educational environment of the university is presented. **Conclusion.** The introduction of digital technologies and digital tools, their use in managing an organization, in providing access to digital educational and methodological materials, in expanding the space for creativity contributes to the transition to a model of a personalized organization of the educational process. In turn, the digital educational environment is aimed at improving the quality of education and promoting the educational results of students, controlling them and quickly evaluating them.

Keywords: digital educational environment, digital technologies, project activity, management model

For citation: Podpovetnaya Yu.V., Najmiddinov A.M., Ovsyanitskaya L.Yu., Podpovetny A.D. Model of project management in the digital educational environment of the university. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(4):96–108. DOI: 10.14529/ctcr220410

Научная статья
УДК 378 + 005.8
DOI: 10.14529/ctcr220410

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ В ЦИФРОВОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ УНИВЕРСИТЕТА

Ю.В. Подповетная^{1, 2}, y-u-l-i-a-v-a-l@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1673-7720>
А.М. Наджмиддинов³, asadullo-tj@mail.ru
Л.Ю. Овсяницкая⁴, larovs@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6598-9110>
А.Д. Подповетный¹, ruter98@mail.ru

¹ Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации
(Уральский филиал), Челябинск, Россия

² Южно-Уральский технологический университет, Челябинск, Россия

³ Таджикский государственный финансово-экономический университет, Душанбе,
Республика Таджикистан

⁴ Международный институт дизайна и сервиса, Челябинск, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены основные аспекты управления проектной деятельностью в цифровой образовательной среде. Особое значение уделено решению проблемы по совершенствованию теоретико-методологических и технологических основ эффективного управления проектной деятельностью студентов в цифровой образовательной среде университета. **Цель исследования** заключается в разработке и теоретическом обосновании модели управления проектной деятельностью студентов в цифровой образовательной среде университета. **Материалы и методы.** Решение указанной проблемы в тексте статьи проведено на основе структурного анализа проектной деятельности, в результате чего определены структурные компоненты и функциональные возможности, проведен анализ на соответствие сложившейся системы функциональным требованиям, разработаны и обоснованы мероприятия по эффективному управлению проектной деятельностью студентов. На основе исследования принципов построения цифровой образовательной среды проведен анализ и моделирование процесса управления проектной деятельностью. Определена структура цифровой образовательной среды университета, которая включает совокупность информационных систем, направленных на реализацию основных образовательного процесса. С целью обеспечения эффективного управления проектной деятельностью студентов разработана авторская модель управления проектной деятельностью в цифровой образовательной среде университета. Внутреннее строение модели обеспечивают пять основных блоков: теоретико-методологический, перспективно-целевой, содержательно-смысловой, организационно-деятельностный и интегративно-оценочный. Представлена технология реализации модели управления проектной деятельностью студентов в цифровой образовательной среде университета, разработанная в логическом единстве содержательной, процессуальной и организационной характеристик. **Результаты.** На основе анализа научной и методической литературы, практики высшего образования выявлено современное состояние проблемы управления проектной деятельностью студентов. Определены особенности цифровой образовательной среды вуза и её возможности в развитии проектной культуры студентов. Разработана и обоснована модель управления проектной деятельностью студентов, включающая методологические основания, понятийно-категориальный аппарат, теоретический базис и содержательно-смысловое наполнение. Представлена технология реализации модели управления проектной деятельностью студентов в цифровой образовательной среде университета. **Заключение.** Внедрение цифровых технологий и цифровых инструментов, их использование в управлении организацией, в обеспечении доступа к цифровым учебным и методическим материалам, в расширении пространства для творчества содействует переходу к модели персонализированной организации образовательного процесса. В свою очередь цифровая образовательная среда направлена на повышение уровня качества образования и содействие образовательным результатам обучающихся, контролируя их и оперативно оценивая.

Ключевые слова: цифровая образовательная среда, цифровые технологии, проектная деятельность, модель управления

Для цитирования: Model of project management in the digital educational environment of the university / Yu.V. Podpovetnaya, A.M. Najmiddinov, L.Yu. Ovsyanitskaya, A.D. Podpovetny // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 96–108. DOI: 10.14529/ctcr220410

Introduction

The development of the economy and society requires universities to implement not a traditional, but a competency-based approach to teaching students. Students must master a variety of complex competencies, learn to independently search for information, analyze it and apply it to solve various problems of their future professional activities. One of the possible tools for the implementation of the competence-based approach is the project method [1, 2].

In modern conditions, digital technologies are used and implemented in almost all major spheres of life. Obtaining new ways of implementing information and digital technologies on the world market leads to the implementation of modern and optimal management mechanisms, which annually increase their influence on the main spheres of the economy, as well as on education and the activities of educational institutions. It is important to note that the educational process in a rapidly changing environment has the properties of continuity, orientation to socially significant aspects, personal certainty, and necessarily takes into account all the needs and personal interests of students. Obviously, in such conditions, optimal management decisions should be based on large amounts of data and promptly processed using modern technologies. In turn, it is advisable for leading educational institutions in the process of their main activities to take into account not only forecast changes, but also to actively implement innovative processes in order to obtain distinctive features and competitive advantages [3–5].

Today, education is mainly in demand for various digital technologies (media platforms, electronic resources, software, etc.), which are more focused on the implementation of high-level educational opportunities, which leads to an increase in the efficiency of the entire educational process, in where teachers and students are at the center of networking. Modern digital technologies are aimed at solving the main tasks of education that are not feasible or cannot be fully solved using traditional educational tools and technologies. First of all, digital technologies in educational processes are aimed at creating conditions for increasing and improving the quality of this process, at purposefully ensuring the optimal functioning of the entire structural organization. These circumstances imply the targeted use of planning systems based on digital tools; the use of electronic document management, which ensures the effectiveness of the development process and management decision-making; creation of optimal conditions for the implementation and management of project activities of students [6; 7].

Statement of the problem

Analysis of the work of the available scientific base for the development of effective management of project activities of students in an educational organization [1–8] and the reflection of their own scientific and pedagogical experience in the digital educational environment of the university made it possible to identify the contradictions that have developed in theory and practice:

– *at the socio-pedagogical level* – between the socially conditioned requirements of society to improve the efficiency of the process of managing the project activities of university students and the insufficient level of manifestation of project competencies of students (project knowledge and skills) in this activity;

– *at the scientific and theoretical level* – between the complex nature of the implementation of interaction in the implementation of the project work of 1st-2nd year students and the insufficient elaboration of scientific and methodological materials and instructions.

– *at the scientific and methodological level* – between the complex nature of the process of managing the project activities of junior students of the university and the undeveloped scientific and methodological support of this process in the digital educational environment of the university.

The problem of research follows from the above contradictions: what are the theoretical, methodological and technological foundations of effective management of project activities of students in the modern digital environment of an educational institution. And the main task is to create and theoretically explain the developed scheme for managing the project work of students in the digital environment of an educational institution.

In accordance with the set goal, the following tasks have been identified:

1. Based on the study of scientific materials, the practice of higher education, to reveal the current state of the problem of management of project activities of students.
2. Determine the features of the modern digital environment of an educational institution and identify its possibilities in the development of the project culture of students.

3. To develop and substantiate a model of management of project activities of students, including methodological foundations, conceptual and categorical apparatus, theoretical basis and content and semantic content.

4. To present the technology of implementation of the model of management of project activities of students in the digital educational environment of the university, which ensures an effective process of development of the project culture of students.

Analysis of the project activities structure

Project activity is an activity aimed at achieving a predetermined result, creating a certain unique product or service. The concept of “project activity” is based on the concept of “project”. Common features that distinguish the project from other activities:

- 1) focus on achieving specific goals with a specific beginning and end;
- 2) limited length in terms of time, cost and resources;
- 3) originality and uniqueness (to a certain extent);
- 4) complexity – the presence of a large number of factors that directly or indirectly affect the progress and results of the project;
- 5) legal and organizational support – the creation of a specific organizational structure for the duration of the project [7, 8].

Any project is implemented through a series of phases, has a beginning and end. The project life cycle is a sequence of phases from the beginning to the end of the project, defined according to the needs of the project management. All projects, as a rule, have the following phases within the framework of the international project management standard [4, 5]:

- 1) initiation: identification of a problem situation, development of a project charter, identification of stakeholders, team building;
- 2) planning: developing a plan, defining the scope of the project, creating the structure and scope of work, estimating resources, defining the organizational structure and sequence of work, estimating the duration of work, developing a schedule, estimating costs, developing a budget, defining and assessing risks, developing a supply plan, developing quality plan, development of a communications plan;
- 3) execution: direct work on the project, stakeholder management, development of the project team, formation of an attitude to risks, ensuring quality requirements, selection of suppliers, dissemination of information;
- 4) management: management of project work, change management, management of the substantive part of the project, management of basic resources (temporary, technical, human, etc.), management of the entire project team, management of the strategic schedule of project activities, management of all cost items for project implementation, management of possible and latent risks, management and preservation of the quality of the educational process, management of the administrative part of the project, management of communication processes, etc.;
- 5) results: the result of a task or a series of tasks, reflex, formulation of key findings and analysis of the success of the project.

Project activity always has a number of limitations, which include the duration of the project; availability of the project budget; availability of resources for the project; factors related to the health and safety of the project team; the level of acceptable risk in the project; possible consequences of the project in the social sphere; regulatory documents that must be followed when performing work.

Project activity of students is a motivated independent activity focused on solving a certain practically or theoretically significant problem, formalized in the form of a final product. This product (the result of project activities) can be seen, comprehended, applied in real practice. *The main goal* of project activity is the independent acquisition of skills in the process of performing the assigned tasks, the solution of which is possible by combining skills and knowledge from various fields of activity.

The result of such activities is the development of a project culture, which is defined as a social and professional component of professional culture, including such components as: project-oriented self-consciousness, professional and creative thinking, scientific and project skills of students and assuming a fairly high level of implementation of project activities, scientific understanding of the used project means and, as a consequence, the effectiveness of educational, scientific and innovative activities of students (Fig. 1) [3–5].

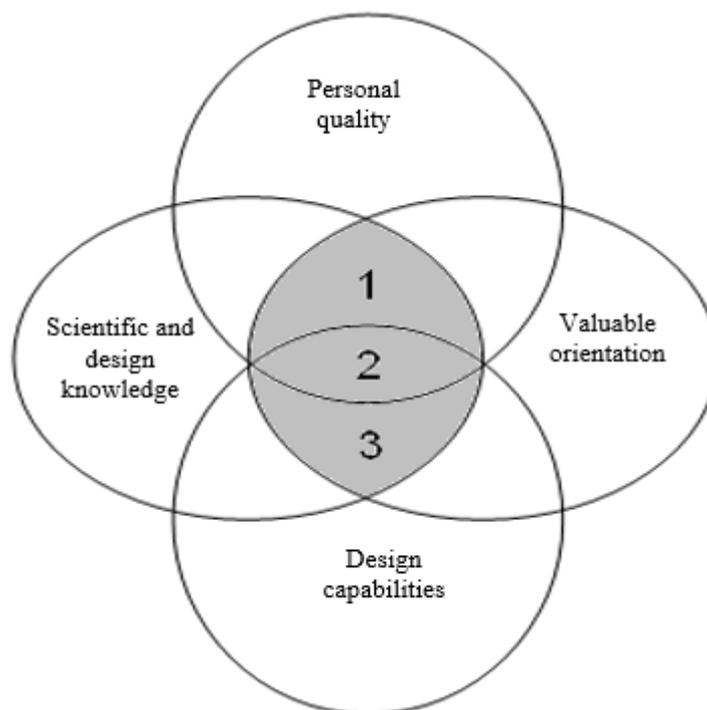


Fig. 1. Structural components of the project culture of students: 1-2-3 – project culture: 1 – project self-awareness; 2 – creative thinking; 3 – scientific and design skills

Project self-awareness as a structural component of project culture can be considered as the result of an optimal synthesis of the professional qualities of a person, value orientations and scientific-project (professional) knowledge / skills of students. This component can be traced in the process of a student's attitude to the implementation of real project activities and is expressed in such target settings that are aimed at comprehension, introspection and self-assessment of project activities and their results.

Design and creative thinking is an important component of design culture and involves the synthesis of professional and personal qualities of students, professional and value orientations, scientific and design professional knowledge and optimal design abilities. Such thinking is aimed at finding innovative opportunities for the implementation and application of scientific and project knowledge and professional skills in the implementation of the main stages of project activities.

It is expedient to consider scientific and project professional skills as professional and personal education, which is formed with the help of scientific and project knowledge and professional and project abilities, based on value orientations in the field of future professional activity. These skills are necessary for the practical implementation of project activities and assume, on the basis of the scientific principle, to determine and implement meaningful, organizational-methodological and procedural-effective means of project activities.

The development of a project culture is determined by the internal activity of the student's personality, his focus on transforming his views in relation to project activities and involves the restructuring of the value-semantic sphere, the formation of a special system of values, meanings, motives, beliefs and attitudes. In the logic of the idea of “cultural ascent and personal expansion” (L.S. Vygotsky), the development of a project culture is a consistent and phased implementation of students' aspirations for excellence in the implementation of project activities. In other words, the staged nature of the corresponding changes is manifested in the “ascent to the project culture” along the steps of the “hierarchical ladder”: “subject project culture” – “specialized project culture” – “perfect project culture”.

Principles of building a digital educational environment

Within the framework of the national project “Education”, the Federal project “Digital educational environment” is being implemented. The target model of the digital educational environment (DEE) is also noted, the direction of improving the educational system is indicated – the implementation of the educational process in the modern digital environment.

Currently, the concept of “digital educational environment” (DEE) is actively used in the field of education all over the world. Thus, the search engine Yandex gives 4 million results for the query “digital educational environment”, and Google – 1 billion 330 thousand for the query “digital learning environment”. A brief analysis of the results allows us to see that DSP is mainly understood as “technical solutions to support educational, teaching and scientific activities” (Suhonen) [9, 10], “an open set of information systems designed to provide various tasks of the educational process” [3–5]. Consequently, DEE presupposes the emergence and use in the educational process of various digital technologies and digital educational resources as teaching aids. The digital educational environment provides ample opportunities for the implementation of diverse communicative and effective relationships.

The digital educational environment (DEE) is an open set of information systems designed to provide various tasks of the educational process. Openness means the ability and right of any user to use different information systems as part of a DSP, replace them or add new ones. The environment is fundamentally different from the system in that it includes completely different elements: both coordinated with each other and duplicating, competing and even antagonistic [11, 12].

Organizational principles for building a DEE:

1) the principle of unity is the coordinated use in a single educational and technological logic of various digital technologies that solve various specialized tasks in different parts of the DEE;

2) the principle of openness, i.e. freedom to expand DEE with new technologies, including connecting external systems and interchanging data based on published protocols;

3) the principle of accessibility is the unlimited functionality of both commercial and non-commercial DEE elements in accordance with the licensing terms of each of them for a specific user, as a rule, via the Internet, regardless of the connection method;

4) the principle of competitiveness, i.e. freedom to fully or partially replace DEE with competing technologies;

5) the principle of responsibility is the right, duty and the ability of each subject, at his own discretion, to solve the problems of informatization in his area of responsibility, including to participate in the coordination of tasks for the exchange of data with related information systems;

6) the principle of sufficiency is the compliance of the composition of the information system with the goals, tasks and abilities of the subject, without unnecessary tasks and data schemas that lead to additional costs;

7) the principle of utility, that is, the formation of new opportunities and / or a decrease in user labor costs due to the introduction of DEE.

Description of the project management model in the digital educational environment. In order to ensure effective management of students' project activities, an author's model has been developed (Fig. 2). The presented model is built into the digital educational environment that has developed in the university and is focused on the development of project self-awareness, creative thinking and scientific and project skills of students. The internal structure of the model is provided by theoretical-methodological, perspective-target, content-semantic, organizational-activity and integrative-evaluative blocks. Let us give a brief description of the indicated blocks of the model.

The theoretical and methodological block reveals the initial theoretical provisions and the author's conceptual position in terms of constructing an integral process of managing the project activities of junior university students. It is formed by two main elements: a) methodological approaches, b) project theories, concepts, standards.

Methodological approaches reflect ontological ideas about the nature and specifics of the process under study. The peculiarity of the choice of a set of methodological approaches lies in the fact that they allow one to discover the essential side of the process of managing project activities of junior university students (axiological, acmeological and anthropological approaches) and procedural (institutional, personality-activity, system-synergetic approaches) planes.

Project theories, concepts and standards capture the prevailing scientific views and requirements for the project management process. This includes: theories of project activity and its development in the educational environment; theories of professional and personal development and self-development; the concept of personal and professional development of students in the educational process; research in the field of organizing design, innovation, scientific and design activities in an educational institution; project management standards (ISO 10006–97; PRINCE 2, etc.).

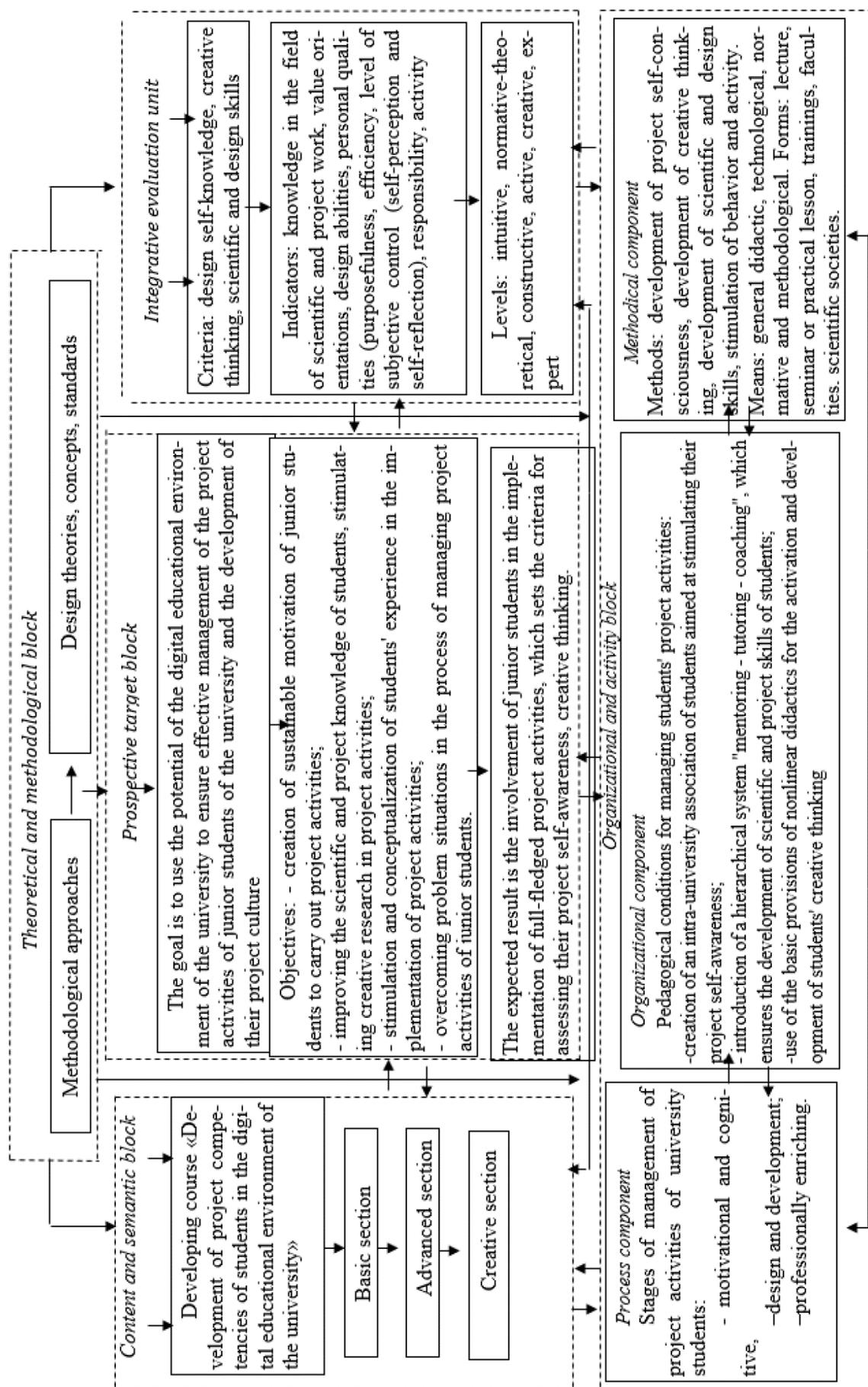


Fig. 2. Model of student project management

The prospective-target block determines the strategic plan for the implementation of the author's model and the general direction of the process of managing the project activities of students, which allows you to get an idea of the initial foundations for designing the expected results. The goal of implementing the model is formulated as using the potential of the digital educational environment of the university to ensure effective management of the project activities of junior university students and the development of their project activities.

The content-semantic block reflects the subject of activity that underlies the process of managing the project activities of students, and the corresponding semantic content of the main directions of project activities in the digital educational environment of the university. It represents the unity of theoretical concepts and effective ways of implementing the design, innovation and scientific activities of students.

The organizational and activity block is characterized by the understanding that the management of students' project activities is an extremely complex and phased process. At each of the stages in the student's personal sphere, quite specific psychological neoplasms appear, indicating his progress towards his "acme". In accordance with this, the organizational and activity block is represented by several components: procedural, organizational and methodological. The procedural component reflects the proliferation of the process of managing the project activities of junior university students and captures three stages: motivational-cognitive, project-developing, professional-enriching. The organizational component defines practice-oriented conditions that form a "comfortable" environment for the effective management of students' project activities and the development of their project culture. Practice-oriented conditions reveal the strategy of students' ascent to the optimal level of project culture. The methodological component provides an activity-based implementation of the project management of students and is represented by the forms, methods and means of the digital educational environment of the university, in accordance with the specifics and characteristics of junior students.

The integrative evaluation block allows you to assess the degree of correspondence of the obtained results to the desired ones, and ensures the establishment of feedback. The corresponding grade is set on the basis of the current / intermediate and final results of project activities, the justification of which can be using the appropriate criteria and indicators that determine the level and process of development of students' project culture. Among the main criteria it is possible to choose: a deep understanding of projects, creativity, the ability to apply scientific knowledge in design. The key indicators will determine the optimal and effective combinations based on such indicators as: awareness of aspects of project work, orientation on value attitudes, effective management abilities, digital knowledge and skills, such personality qualities of students as: purposefulness, performance, self-control, confidence, efficiency.

The main levels of the implementation of student project culture are correlated with the project-personal characteristics: creative, activity-based, scientifically grounded, normative, professional and are determined taking into account the formation of the project culture through the manifestation of project self-awareness, creative thinking, scientific and project skills.

Technology for project management in a digital educational environment

The technology for implementing the author's model for managing student project activities in the digital educational environment of the university is developed in the logical unity of the content, procedural and organizational characteristics of the process of developing the project culture of students, presented as the goal and content of the process under study, participatory teaching methods and practice-oriented conditions [12–14].

The content characteristic is a set of goals and content of the development process of student project culture, which are selected on the basis of the identified patterns and principles of the digital educational environment of the university.

Goal setting is a mechanism that brings together the results of a person's understanding of basic values, key motives, future professional qualities with alternative goals of professional development. Therefore, the goal-setting process has a tiered nature and involves three main levels of goals: 1st level – customers (the designer of the project task is the state and the business community), 2nd level – performers (project group of students, project curators) and the third level – consumers (participants in the knowledge economy market).

The content of the technology is reflected in the developmental course "Development of project competencies of students in the digital educational environment of the university", a distinctive feature

of which is differentiation, i.e. three independent sections (basic, advanced and creative) have been developed in accordance with the students' level of project culture. The sections are built on a modular basis, taking into account the experience of project activities, project competencies and individual characteristics of students.

The transformative characteristic includes a number of technologies, approaches and forms of development of the project culture of students. When implementing the author's model for managing student project activities, it is advisable to use participatory teaching methods, which are represented by five structural groups: a) methods of developing project self-awareness (situational role projects, mutual learning, mutual observation, mutual reflection of project activity); b) methods of developing design skills (game design, mutual compromise design, group consulting design); c) methods for the development of creative thinking (situational analysis, project method, methods of psychological activation – brainstorming, reverse brainstorming, synectics); d) methods of stimulating project activities (feedback, rating, generalization of best practices in project activities); e) control methods (tests, project simulator, portfolio, mutual control and evaluation of project activities).

The coordination characteristic reveals the essence and features of practice-oriented conditions, which are developed on the basis of necessary and sufficient measures, and are designed to form an effective environment and an optimal environment for the high-quality implementation of the author's model of student project management. A separate highlighted condition is purposefully directed at the development of a certain component from the structure of the student's project activity. These conditions are implemented in accordance with the levels (steps) of ascent to the project culture and presuppose the allocation of the subject, specialized and perfect level.

The first condition is an association of students, which is created within a certain university, and stimulates the development of students' self-awareness in the process of project activities. This condition presupposes the process of the formation of self-awareness, which takes place on the basis of the use of various combinations of stimuli and fixes the dynamic changes that appear with the use of various methods and techniques of project activity: exchange of experience in project activities; contests for the best author's projects or developments; ratings of student projects; contests, for example, “project erudite”, “guru-researcher”, etc.; evaluation of design work, originality and effectiveness of projects, etc. novelty and effectiveness of projects, etc. The described activities realize the ability to assess the achievements of students, depending on their results of project work.

The second condition is the development and implementation of a hierarchical system “mentoring – tutoring – coaching”, which ensures the development of students' project skills, which are classified as: analytical-informational, constructive-predictive, creative-activity, evaluative-reflexive and organizational-regulatory.

The third condition is the use of the principles of the development of students' creative thinking. Based on the provisions of the nonlinear didactics of German teachers (S. Greif, L. Günter, M. Herold, H.-J. Kurtz, P. Koch, B. Landherr, H.W. Roth), the basic principles of the development of students' creative thinking in project activities are highlighted: 1) the principle of simplicity of basic samples and self-similarity of design activities; 2) the principle of self-organization and orientation towards the goals of project activities; 3) the principle of self-optimization and the dynamics of project activities.

The substantive, procedural and organizational characteristics of the technology of the author's model of student project management are implemented in the digital educational environment of the university. The digital environment of an educational organization presupposes certain ICT tools that are systematized and meet the requirements of the Federal State Educational Standard, which is aimed at more effective achievement of the results of student project management.

The digital environment should become a common field of interaction for all participants in this process, an effective tool for managing the quality of project activities of university students. The substantive, procedural and organizational characteristics of the technology of the author's model of student project management are implemented in the digital educational environment of the university.

It is important to note that the digital environment of any educational organization is based on the use of ICT tools that meet the requirements of the Federal State Educational Standard, imply dynamic changes in the internal environment of the organization and are selected taking into account the possible effective achievement of positive results of project activities. The digital environment should become a common field of interaction for all participants in this process, an effective tool for managing

the quality of project activities of university students. Consequently, the openness of this environment, which is based on ensuring the ability to use information systems by participants in the education process, and also involves the direct replacement or adjustment of the composition of the components that make up the content of the digital educational environment, should be attributed to the main principles of the development of project activities of students in modern conditions.

In particular, the actual components of student project management in the digital educational environment of the university are:

- information services for project training;
- partner's personal account;
- service for constructing an individual trajectory of a student;
- a service for choosing a project by a student (with a selection aid system, based on the student's chosen development path);
- service of interaction of student teams;
- point-rating system for assessing the project activities of students, etc.

It should be noted that in accordance with modern trends in the modernization of higher professional education, the dynamic development of the digital educational environment of the university is taking place. The primary task of such an environment is the optimal and efficient provision of modern information and communication services, as well as basic digital tools to all participants in the ongoing educational process. Taking into account this aspect, each educational organization has a goal and main task to improve and modernize the information and educational university environment, which should be as convenient and comfortable as possible for interaction and effective cooperation of all participants in the educational process. To achieve this goal and solve the main problems, the educational organization should be equipped with modern infrared technology and up-to-date software as much as possible. Undoubtedly, this circumstance presupposes taking into account the existing level of competence of all university employees, which allows the effective use of modern software tools in the educational process [15].

Therefore, it is advisable to consider the university digital environment from the standpoint of the effectiveness of the system of information and educational technologies and software resources, which are designed to form a sustainable digital environment and ensure the effective implementation of the process of managing educational activities at the university. In addition, for optimal and effective management of the project activities of university students, the main participants in the educational process need to navigate at a sufficient level in a wide variety of modern software products and information and communication tools of education. Therefore, when choosing the optimal digital educational tools and applications, it is necessary to take into account their main focus, which involves such key aspects as:

- the formation of professional tasks of project activities of students, their classification, implementation and obtaining specific results;
- development of measures to provide opportunities for targeted feedback of all project participants and the project manager;
- focus on the optimal creation and effective sharing of digital products in the implementation of project activities;
- systematizing the process of monitoring and evaluating the results of project activities, obtaining a visual representation of the designed product, analyzing opportunities for further implementation of project activities;
- the formation and improvement of the activities of virtual associations, within the framework of which the effectiveness of project activities is analyzed as a whole for the entire association and for each participant separately;
- implementation of electronic document management in project activities and organization of the process of rapid exchange of information on project documentation based on electronic service facilities.

We also need to point out the process of formation of a modern and effectively functioning digital educational environment of the university, such criteria as: 1) the level of digital competence of teachers in the implementation of project activities; 2) requirements and restrictions on the use of digital resources in the process of managing students' project activities; 3) modern access to the use of digital

technologies by students in project activities; 4) equipment and provision of the university with modern electronic and digital resources; 5) project-oriented conditions for the use of digital tools by participants in the project management process; 6) unlimited and uninterrupted access to digital resources, local network and global Internet; 7) timely development and improvement of the information and technical infrastructure of the digital educational environment of the university.

Conclusion

Based on the study of the principles of building a digital educational environment, an analysis and modeling of the process of managing students' project activities was carried out. The structure of the digital educational environment of the university is revealed, presented as an open set of information systems designed to provide various tasks of the educational process. In order to ensure effective management of project activities of students, an author's model of project management in the digital educational environment of the university has been developed. The internal structure of the model is provided by theoretical-methodological, perspective-target, content-semantic, organizational-activity and integrative-evaluative blocks.

It is substantiated that the digital educational environment of the university helps in solving the following management tasks:

- informational and methodological support of the educational process;
- rational planning of the educational process, optimization and its material and technical support;
- effective monitoring of the educational process;
- organization of work with information flows;
- optimization of the interaction of all subjects of the educational process;
- remote interaction with partner organizations;
- increasing the prestige of the educational organization.

With this approach to the digitalization of project activities, the functioning of an educational organization becomes a significant indicator that confirms the effective development, competitiveness and demand in the educational services market. In this context, the digital educational environment of the university plays the role of the main criterion for assessing the quality of education and the effectiveness of management of educational activities.

It should be noted that digitalization of the process of management of project activities of students does not replace traditional and proven project methods and management technologies, but acts as an important and modern addition to obtaining the necessary information, providing visibility and optimal choice to achieve the set indicators and positive results. The model for managing project activities of students in the specific conditions of the digital educational environment of the university is designed to provide the ability to systematically and efficiently identify problems in the process of managing project activities, as well as promptly making optimal management decisions.

References

1. Ignatova N.Yu. Digital multy-tasking and students learning. *Open and distance education*. 2019;4(60):27–36. (In Russ.) DOI: 10.17223/16095944/60/4
2. Ilyina O.N. *Metodologiya upravleniya proektami: stanovlenie, sovremennoe sostoyanie i razvitie: monografiya* [Project management methodology: formation, current state and development: monograph]. Moscow: Vuzovskiy uchebnyk; 2018. 208 p. (In Russ.)
3. Kurkina N.R., Starodubtseva L.V. Digital education environment as a increase efficiency the management of an educational organization. *Modern high technologies*. 2019;11(1):220–224. (In Russ)
4. Reshetka V.V. A projective method of teaching as a means of realization of a profession oriented education. *Professional education in Russia and abroad*. 2019;2(10):83–86. (In Russ.)
5. Heldman, K. *Upravleniye proyektami: Bystryy start* [Project Management: Quick Start]. Transl. from Engl. Moscow: DMK Press: Akademiya AyTi; 2008. 352 p. (In Russ.)
6. Kirillova S.V. Digital transformation of educational environment. *Ekonomicheskaya sreda*. 2021;4(38):22–30. (In Russ) DOI: 10.36683/2306-1758/2021-4-38/22-30
7. Gribova E.N. [Digital Educational Environment as a Tool for Improving Management Efficiency in Universities, Professional Educational Organizations and Schools]. In: *Scientific Forum: Pedagogy and Psychology*; 2020. P. 17–21. (In Russ.)

8. Shevtsova I.V. The training method for digital data operation. *Otkrytoe obrazovanie*. 2020;24(4):32–40. (In Russ.) DOI: 10.21686/1818-4243-2020-4-32-40.
9. Gancharik L.P. Open education system in management training in the digital economy. *Otkrytoe obrazovanie*. 2019;23(2):23–30. (In Russ.) DOI: 10.21686/1818-4243-2019-2-23-30
10. Chernykh S.I., Borisenko I.G. Digital educational environment as the main trend in the education transformation. *Philosophy of Education*. 2021;21(3):5–17. (In Russ) DOI: 10.15372/PHE20210301
11. Rodionova V.N., Turovets O.G., Shotylo D.M. The application of the project-based method of training in devising a master's degree course on high-tech production organization. *Organizer of production*. 2019;27(1):90–102 (In Russ.) DOI: 10.25987/VSTU.2019.76.81.010.
12. Balyaeva S.A. [Elements of Innovative Teaching Technology in the Digital Educational Environment of the Maritime University]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2022;85-4:35–37. (In Russ.) DOI: 10.18411/trnio-05-2022-144
13. Ambrosenko N.D., Skuratova O.N., Shmeleva Zh.N. Preliminary results of the university participation in the project “modern digital educational environment”. *Azimuth of Scientific Research: Pedagogy and Psychology*. 2019;8(1(26)):16–19. DOI: 10.26140/anip-2019-0801-0002
14. Simonovich N.E. [The use of digital technologies in the cultural and educational environment of Russian universities: a psychological component]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2020;67-3:36–40. (In Russ.) DOI: 10.18411/lj-11-2020-89
15. Yankelevich S.S., Seredovich S.V. Digital educational environment of a modern university. *Aktual'nyye voprosy obrazovaniya*. 2021;(1):7–15. (In Russ.) DOI: 10.33764/2618-8031-2021-1-7-15

Список литературы

1. Игнатова Н.Ю. Цифровая многозадачность и обучение студентов // Открытое и дистанционное образование. 2019. № 4 (60). С. 27–36. DOI: 10.17223/16095944/60/4
2. Ильина О.Н. Методология управления проектами: становление, современное состояние и развитие: моногр. М.: Вузовский учебник, 2018. 208 с.
3. Куркина Н.Р., Стародубцева Л.В. Цифровая образовательная среда как инструмент повышения эффективности управления образовательной организацией // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 11-1. С. 220–224.
4. Решетка В.В. Проектный метод обучения как средство реализации практико-ориентированной технологии // Профессиональное образование в России и за рубежом. 2019. № 2 (10). С. 83–86.
5. Хэлдман К. Управление проектами: Быстрый старт: пер. с англ. М.: ДМК Пресс: Академия АйТи, 2008. 352 с.
6. Кириллова С.В. Цифровая трансформация образовательной среды // Экономическая среда. 2021. № 4 (38). С. 22–30. DOI: 10.36683/2306-1758/2021-4-38/22-30
7. Грибова Е.Н. Цифровая образовательная среда как инструмент повышения эффективности в сфере управления в вузах, профессиональных образовательных организациях и школах // Научный форум: педагогика и психология. 2020. С. 17–21.
8. Шевцова И.В. Методика обучения работе с цифровыми данными // Открытое образование. 2020. Т. 24, № 4. С. 32–40. DOI: 10.21686/1818-4243-2020-4-32-40
9. Ганчарик Л.П. Система открытого образования в подготовке управленческих кадров в сфере цифровой экономики // Открытое образование. 2019. Т. 23, № 2. С. 23–30. DOI: 10.21686/1818-4243-2019-2-23-30
10. Черных С.И., Борисенко И.Г. Цифровая образовательная среда – основной тренд трансформации образования // Философия образования. 2021. Т. 21, № 3. С. 5–17. DOI: 10.15372/PHE20210301
11. Родионова В.Н., Туровец О.Г., Шотыло Д.М. Применение проектного метода обучения в создании магистерского курса по организации высокотехнологичных производств // Организатор производства. 2019. Т. 27, № 1. С. 90–102. DOI: 10.25987/VSTU.2019.76.81.010
12. Баляева С.А. Элементы инновационной технологии обучения в цифровой образовательной среде морского университета // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 85-4. С. 35–37.

13. Ambrosenko N.D., Skuratova O.N., Shmeleva Zh.N. Preliminary results of the university participation in the project “modern digital educational environment” // *Azimuth of Scientific Research: Pedagogy and Psychology*. 2019. Vol. 8, no. 1 (26). С. 16–19. DOI: 10.26140/anip-2019-0801-0002

14. Симонович Н.Е. Применение цифровых технологий в культурной и образовательной среде российских университетов: психологическая составляющая // *Тенденции развития науки и образования*. 2020. № 67-3. С. 36–40. DOI: 10.18411/lj-11-2020-89

15. Янкелевич С.С., Середович С.В. Цифровая образовательная среда современного университета // *Актуальные вопросы образования*. 2021. № 1. С. 7–15. DOI: 10.33764/2618-8031-2021-1-7-15

Information about the authors

Yulia V. Podpovetnaya, Dr. Sci. (Education), Ass. Prof., Prof. of the Department of Social and Humanitarian and Natural Science Disciplines, Financial University under the Government of the Russian Federation (Ural Branch), Chelyabinsk, Russia; Prof. of the Department of Economics and Management, The South Ural University of Technology, Chelyabinsk, Russia; y-u-l-i-a-v-a-l@mail.ru.

Asadulla M. Najmiddinov, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Head of the Department of Mathematical Modeling and Information, The Tajik State University of Finance and Economics, Dushanbe, Republic of Tajikistan; asadullo-tj@mail.ru.

Larisa Yu. Ovsyanitskaya, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Department of Mathematics and Informatics, International Institute of Design and Service, Chelyabinsk, Russia; larovs@rambler.ru.

Artem D. Podpovetny, 1st year master's student in the direction of “Management”, Financial University under the Government of the Russian Federation (Ural Branch), Chelyabinsk, Russia; ruter98@mail.ru.

Информация об авторах

Подповетная Юлия Валерьевна, д-р пед. наук, доц., проф. кафедры социально-гуманитарных и естественно-научных дисциплин, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Уральский филиал), Челябинск, Россия; проф. кафедры экономики и управления, Южно-Уральский технологический университет, Челябинск, Россия; y-u-l-i-a-v-a-l@mail.ru.

Наджмидинов Асадулло Мирзоевич, канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой математического и информационного моделирования, Таджикский государственный финансово-экономический университет, Душанбе, Республика Таджикистан; asadullo-tj@mail.ru.

Овсяницкая Лариса Юрьевна, канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой математики и информатики, Международный институт дизайна и сервиса, Челябинск, Россия; larovs@rambler.ru.

Подповетный Артём Дмитриевич, магистрант 1-го курса направления «Менеджмент», Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Уральский филиал), Челябинск, Россия; ruter98@mail.ru.

The article was submitted 21.09.2022

Статья поступила в редакцию 21.09.2022

APPLYING THE THEORY OF BUSINESS PROCESSES RE-ENGINEERING WITHIN THE CREATION OF THE UNIFORM INFORMATION SPACE OF THE ENTERPRISE

G.G. Kulikov¹, gennadyg_98@yahoo.com
T.K. Gindullina¹, tamara_ugatu@mail.ru
V.N. Kapustin², Vladimir.Kapustin@iplc.ru
M.S. Demchenko^{1,3}, demchenkoms@mail.ru
R.R. Nabiev³, ravil.nabiev@iplc.ru

¹ Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

² IPL Consulting, Moscow, Russia

³ IPL Consulting, Project office, Ufa, Russia

Abstract. This article focuses on the issues of the practical application of the principles of business process reengineering during the implementation of the project on improvement of the automated system for operational control at the foundry of PJSC “UEC-UMPO” (Public Joint Stock Company “UEC-Ufa Engine Industrial Association”) during the introduction of ERP Infor LN. The essence of the application of the principles of “development of various versions of the project”, and “rationalization of horizontal links” is described in more detail. Application of the principle “development of various versions of the business processes” enables to implementation accounting of the division of one batch of castings into several parts during technological operations. Application of the principle “rationalization of horizontal links” creates the conditions for the formation of common information space for foundry management. This space is related to engineering design issues, process engineering issues, and issues of implementation and management of production processes. Even though reengineering involves “revolutionary” business process change, the use of its principles in the evolutionary path of development is also economically effective and at the same time reduces the risks of project failure. Thus, a simulation of the business process of management of finishing operations during the manufacture of castings performed in BPMN 2.0 showed a reduction in the duration of the processes by more than 15 %. **Aim.** Building a foundry management model in a single information space of the enterprise using the principles of reengineering business processes in the aspect of the management of finished operations. **Materials and methods.** The application of the principles of reengineering business processes to the management of finishing operations in the foundry, BPMN-modeling. **Results.** With the application of the principle of rationalization of horizontal connections, it becomes possible to transmit data from the ERP system to the CAD system and vice versa. A single information space of enterprise management is formed, which allows you to bring together all management functions. **Conclusion.** In this regard, it becomes possible to identify “narrow” places in the management of the foundry and take measures to eliminate them. To increase the level of information exchange between all divisions of the enterprise, which will create a closed production control circuit and will significantly increase the efficiency of using Infor LN.

Keywords: Uniform Information Space, business process, ERP system, IT technologies, management decisions, management automation, foundry industry, finishing operation

For citation: Kulikov G.G., Gindullina T.K., Kapustin V.N., Demchenko M.S., Nabiev R.R. Applying the theory of business processes re-engineering within the creation of the uniform information space of the enterprise. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(4):109–118. DOI: 10.14529/ctcr220411

Научная статья
УДК 004 658.5
DOI: 10.14529/ctcr220411

ПРИМЕНЕНИЯ ПРИНЦИПОВ РЕИНЖИНИРИНГА БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ В РАМКАХ СОЗДАНИЯ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА ПРЕДПРИЯТИЯ

Г.Г. Куликов¹, gennadyg_98@yahoo.com
Т.К. Гиндуллина¹, tamara_ugatu@mail.ru
В.Н. Капустин², Vladimir.Kapustin@iplc.ru
М.С. Демченко^{1,3}, demchenkoms@mail.ru
Р.Р. Набиев³, ravil.nabiev@iplc.ru

¹ Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

² ООО «АЙПЛ Консалтинг», Москва, Россия

³ ООО «АЙПЛ Консалтинг», Проектный офис, Уфа, Россия

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы практического применения принципов реинжиниринга бизнес-процессов при реализации проекта по совершенствованию автоматизированной системы оперативного управления литейным производством ПАО «ОДК-УМПО» (Уфимское моторостроительное производственное объединение) при внедрении ERP Infor LN. Описана сущность применения принципов «разработка различных вариантов проекта», «рационализация горизонтальных связей». Применение принципа «разработка различных вариантов бизнес-процессов» позволяет реализовать учет разделения одной партии отливок на несколько частей при выполнении технологических операций. Применение принципа «рационализация горизонтальных связей» создает условия для формирования единого информационного пространства управления литейным производством. Это пространство связано с вопросами инженерного проектирования, технологического проектирования, реализации и управления производственными процессами. Несмотря на то, что реинжиниринг предполагает «революционное» изменение бизнес-процессов, использование его принципов на эволюционном пути развития так же экономически эффективно и в то же время снижает риски провала проекта. Так, моделирование бизнес-процесса управления финишными операциями при изготовлении отливок, выполненное в BPMN 2.0, показало сокращение продолжительности процессов более чем на 15 %. **Цель исследования:** построение модели управления литейным производством в едином информационном пространстве предприятия с использованием принципов реинжиниринга бизнес-процессов в аспекте управления готовыми операциями. **Материалы и методы.** Применение принципов реинжиниринга бизнес-процессов к управлению отдельными работами литейного производства, BPMN-моделирование. **Результаты.** С применением принципа рационализации горизонтальных связей становится возможной передача данных из ERP-системы в САД-систему и наоборот. Формируется единое информационное пространство управления предприятием, позволяющее объединить все функции управления. **Заключение.** В связи с этим появляется возможность выявить «узкие» места в управлении литейным производством и принять меры по их устранению. Повысить уровень обмена информацией между всеми подразделениями предприятия, что создаст замкнутую схему управления производством и значительно повысит эффективность использования Infor LN.

Ключевые слова: единое информационное пространство, бизнес-процесс, ERP-система, ИТ-технологии, управленческие решения, автоматизация управления, литейное производство, финишные операции

Для цитирования: Applying the theory of business processes re-engineering within the creation of the uniform information space of the enterprise / G.G. Kulikov, T.K. Gindullina, V.N. Kapustin et al. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 109–118. DOI: 10.14529/ctcr220411

Introduction

The scientific interests of the authors of the submitted article concern the problems of automation of the business processes of the machine-building enterprise, building models of the management system of production business processes, adaptation of existing ERP systems to the conditions of real industries, as well as business process reengineering.

Problems of improving the efficiency of activities, and the growth of competitiveness are acutely facing industrial enterprises in the modern digital world. A good plan for the development of information technology in the company involves the creation of a single information space, a single integrated information system, which would allow bringing together all production management functions, all activities of the enterprise and management levels, thereby setting an in-extensive control circuit by all resources of the enterprise. The Uniform Information Space is a set of distributed heterogeneous data repositories, where are standard rules of processing, storage, updating, retrieval, and information transfer through which paperless communication between all stages of the life cycle is conducted work. The Uniform Information Space allows storage on a centralized basis of project data in a single system of control of engineering data, to provide collective interaction between enterprise subdividing and as much as possible to use the processing power to reduce material costs and time.

IPL Consulting specializes in improving business processes and the introduction of corporate information systems for industrial enterprises. Decisions are based on the best sectoral practices and the application of reference models of management of world industry leaders. IPL Consulting is an Infor partner with the status of Infor Gold Channel Partner provides a full range of services in the field of implementing, maintaining, and technical support for INFOR products for industrial companies [1]. The choice of this vendor is due to the best functionality and technological informality of Infor solutions for industrial enterprises of secondary and large businesses [2]. It should be noted that the Infor LN ERP system is chosen as corporate by JSC "United Engine Corporation" (JSC "UEC"). JSC "UEC" is an integrated structure producing engines for military and civil aviation, space programs, gas turbine installations, etc. Currently, JSC "UEC" consists of the twenty-six largest engineering enterprises in Russia is among largest engineering enterprises in Russia, one of which is the Public Joint Stock Company "UEC-Ufa Engine Industrial Association" (PJSC "UEC-UMPO"). There is a pilot operation of an operational management system for the execution of production orders In PJSC "UEC-UMPO". The barcoding system is implemented in the PTC (production and technological center) and integrated with ERP Infor LN. In-shop management and dispatching based on ERP Infor LN are conducted by PJSC "UEC-UMPO" Information Technology division and IPL Consulting teams. The implementation will allow the largest Russian manufacturer of gas turbine engines to create a single information space for production management and production planning, to achieve an increase in labor productivity and cut any errors in planning and accounting for production operations There is a foundry management automation project via ERP Infor LN launched on PJSC "UEC-UMPO" [2].

Features of foundry production

One of the main procurement bases of the machine-building complex is casting production. Foundry production is concentrated on machine-building enterprises, and the performance of foundry workshops determines the performance of the machine-building enterprise. Foundry productions are characterized by a complex management structure defined by the multivariance of the same processes. Such a feature of the foundry is directly affecting all management levels [3].

An essential element of the foundry system is technology, i.e., a step-by-step defined process of turning raw materials into the finished product. The production process in the foundry shops consists of a large number of interrelated operations, but significantly different from each other of operations, the execution of which is divided both in time and geographically (preparation of molding and rod mixtures, production of forms and rods, preparation of metal to smelting, producing liquid metal, pouring and knocking forms, cleaning and hardware castings, control of castings and correction of defects). The large nomenclature and volumes of the production of castings and a broad range of outflows produced by mass predetermine significant fluctuations in the complexity of molding and rod work. In almost all cast shops, several brands of alloys are used. For foundry shops, it is impossible to create reason forms, rods, and liquid metal. Some operations in the manufacture of castings are performed in parallel (for example, the manufacture of forms and rods), while others - are only sequentially (for example, fil-

ling and knocking out forms, cleaning, and stubbing castings), which makes it difficult to synchronize the operation of the main production sites of the workshops. As a result, casting goals are distinguished by a variety of forms of production sites, various in their organizational and technological type.

The casting production processes are significantly different from each other by a set of operations depending on the alloy brand, the interlacing method, the type of casting, and the specifics of the equipment, as well as the required technical parameters of alloys and castings. In the simplified form of the circuit of the casting process, or the process of manufacturing the casting is a mirror of materials, fresh and return, forming a mixture set, and spilling the alloy obtained (with certain properties) in the form [4]. The Table 1 presents the technological stages of two types of casting, demonstrating their diversity.

Table 1

Technological process stages	
Stages of the process	
Sand casting	Chill casting
1. Chills preparation	1. Cores manufacturing
2. Flask preparation	2. Cores stripping
3. Cores manufacturing	3. Quality control of cores
4. Cores drying	4. Charge preparation
5. Preparation of cores	5. Alloy preparation
6. Quality control of cores	6. Preparation of the coquille for operation, assembly, pouring
7. Molding form manufacturing assembly	7. Filling
8. Charge preparation	8. Cores removing
9. Alloy preparation	9. Trimming
10. Crucible preparation	10. Heat treatment
11. Alloy processing	11. Marking
12. Filling the form with alloy	12. X-ray quality control
13. Quality control of the casting process	13. Final quality control
14. Removing molding	14. Cast verification
15. Cores removing	
16. Initial quality control	
17. Trimming	
18. Casting cleaning	
19. Correction of defects	
20. Marking	
21. Heat treatment	
22. X-ray quality control	
23. Final quality control	
24. Cast verification	

The successful functioning of the CTK AT requires large-scale changes in terms of the development of modern technologies and the expansion of production, including the creation of the Uniform Information Space (UIS) [3]. The UIS will allow to store of project data in a single system of engineering data management, to provide collective interaction between departments and maximize the use of the processing power to reduce material costs and time. The UIS creation will solve the problem of registration data exchange between the production system and system and the process design system. Within the UIS creation were applied the principles of business process reengineering [5].

In this work, we consider the practice of reengineering principles using the example of the business process of operational management of the finishing operations execution in a foundry.

The description of the existing process of management by finishing operations in the foundry

Finishing operations are performed in two sections: the finishing operations section and the control section Fig. 1. It is a process of final processing and testing of castings. The finishing operations management is performed to ensure the effective functioning of the foundry.

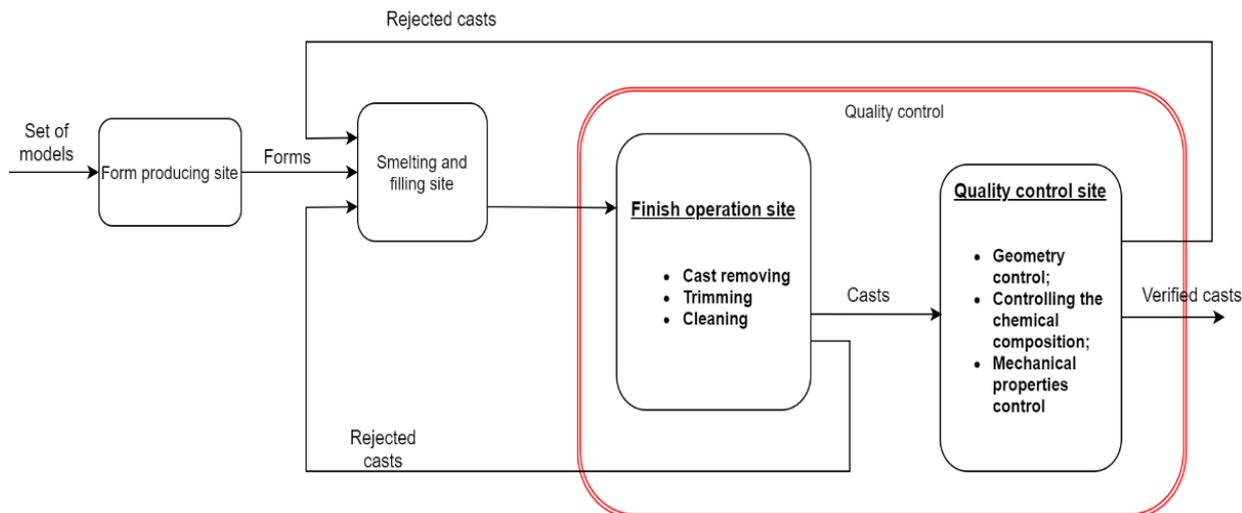


Fig. 1. Titanium Casting Workshop Production Chain Scheme

A block of castings arrives at the finishing operations site, which then undergoes the procedures of knocking out, separating the glacial-nutrient system, and stripping. Next, the castings arrive at the control site, where they undergo warping control, X-ray, and luminescent control. If correctable defects are detected at any control site, the casting is returned to the machining area, where the necessary operations to correct the defect take place. Suitable castings arrive at the site of finished products. At each stage, casting is followed by the production order. If the correctable rejection is detected the control section generates an act of fault detection, which is transmitted to the general foreman of the machining. The foreman issues replaceable jobs to certain groups depending on the type of defect. If the casting declared unfit generated the act of rejection, then this act with the defective product is transmitted in the pantry of defective products. Rejection acts are transferred from the pantry of ready casts to the bureau of quality control (BQC). The BQC generates a report on rejection and indicates there the reasons for rejection. Further, the report of rejection was transferred to the production and dispatch management bureau (PDB). Finish operations are managed by workers of PJSC "UEC-UMPO": general foreman, workload coordinator, head of the workshop, and foreman of dispatch bureau [6].

The existing process identified the following shortcomings:

- the management staff receives the results of plant operations with a delay of one day;
- information system does not allow a full-featured accounting of the separation of parts batches (a part of a batch is issued, and a part goes for correction);
- there is no full-function accounting of rejection;
- IS for recording the production progress and technology and construction engineering IS are not integrated.

These shortcomings significantly reduce the effectiveness of the management of the aluminum alloys foundry complex (AAFC). The existing system is not able to support the effective functioning of the foundry in terms of modern technologies development and expansion of production nomenclature of the positions [7]. This problem shows that the management of foundry production, including finishing operations, needs in improving. It is proposed to apply the principles of business process reengineering to solve the problem.

Applying the principles of business process reengineering

According to the definition by M. Hammer and J. Champy [8, p. 10–11] business process reengineering (BPR) is defined as the fundamental rethinking and radical redesign of business processes to achieve dramatic improvements in critical contemporary modern measures of performance, such as cost, quality, service, and speed.

To improve the management of the finishing operations, offer to use the following principles:

- Horizontal compression business processes.

The implementation of this principle is achieved in the transition from the formation of a production

order (hereafter PO) for the batch to the formation of PO on the casting that will allow taking into account the division of the batch in case of detection of a correctable defect in the part of the batch.

- Decentralization of responsibilities (vertical compression business processes).

The implementation of the principle of vertical compression will allow the decision makers in BQC to select and transmit independently information to CAD systems for future planning.

- The logic of the implementation of business processes.

With the implementation of the tasks of the accounting division of the batch, accompanied by the opening of the new PO, there is the possibility to analyze the progress schedule in parallel with performing operations for the defect's correction. In the existing system, the implementation of the schedule analysis is performed after closing the PO to the batch.

- The development of various versions of business processes.

The proposed information system is provided for the execution of business processes in different scenarios: the batch may separate, and part of the blanks can be found fit, some may return to the correction of the defect, and some may be considered defective.

- Diversification of business processes.

The process focuses on the production of mass products must be conducted equally for all inputs leading to agreed outputs: the separation of the batch should be considered.

- Rationalization of horizontal connections.

Work is performed in the place where it is most appropriate. This principle is shown in the improved process of transferring information from the ERP system to the CAD system at the point where it is more appropriate to do so.

Using the above principles of business process reengineering will change the process of finishing operations management. BQC staff will be able to generate the report in electronic form. The separation of the batch will be considered: the technological Bureau can create a new PO for the act of fault detection, which will transfer to PDB for accounting operations on defect correction. We will consider using the principle of development of various versions of business processes and the principle of rationalization of horizontal connections in more detail.

The principle of development of various versions of business processes allows implementing batch separating owing to the detection of defects during the passage of the control operations. This fact causes the need for the development of various versions of business processes [9, p. 74–77].

The proposed information system allows considering the separation of the batch.

There are three scenarios for the implementation of the business process:

- 1) defects are not detected; the whole batch is found to fit;
- 2) adjustable defect is detected, castings with adjustable defect return to the correction;
- 3) unrecoverable defect is detected; casting is recognized as defective.

For the possibility of accounting for the progress of the production of castings operations, it is necessary to provide all three scenarios. The proposed system solves the problem of considering the separation of the batch by creating a new PO for each casting in which an adjustable defect is found. The technological bureau opens a new PO, further PO is transferred to PDB for accounting operations on defect correction

The process of batch separation is illustrated by a dynamic model of control of finishing operations management Fig. 2. If a defect is verified the possibility of elimination of the defect is checked. If we remove a defect, then a new PO is created and operations on defect elimination are executed.

Applying the principle of rationalization of horizontal connections allows transferring data from the ERP system to CAD systems and back [10]. Such communication consists of the automated transfer of standard information in the form of:

- 1) material master records;
- 2) specifications for materials;
- 3) process charts to materials that contain a list of operations and their duration.
- 4) changes in the existing product technologies.

Statistics of rejection must come directly to the scheduled system of foundry production that will allow the identification of “bottlenecks” of the process and take measures for their elimination. In the offered system the BQC employees can create the report on rejection in the automated mode [11].

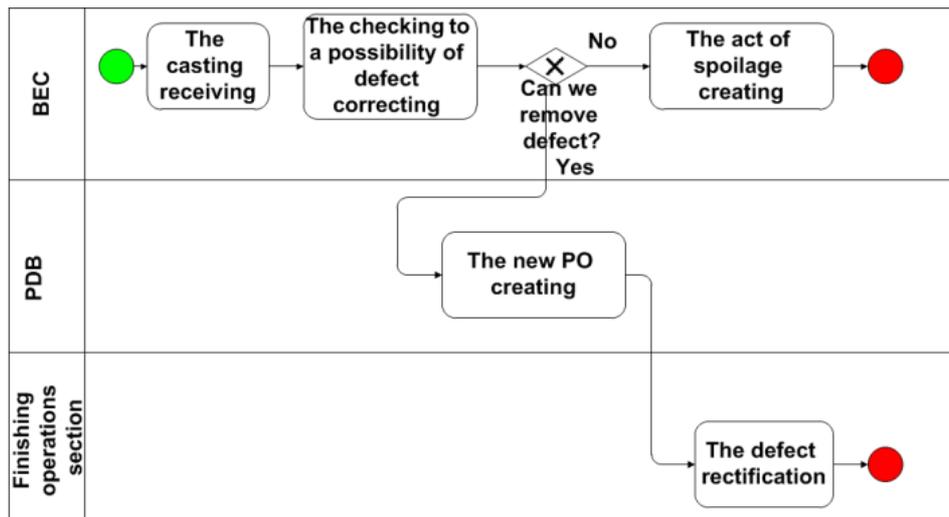


Fig. 2. Dynamic model of the proposed batch separation

Results

To measure the results of improvement of business processes of finishing operations management in foundries were simulated the proposed and the existing processes were. The simulation was based on the BPMN model Fig. 3.

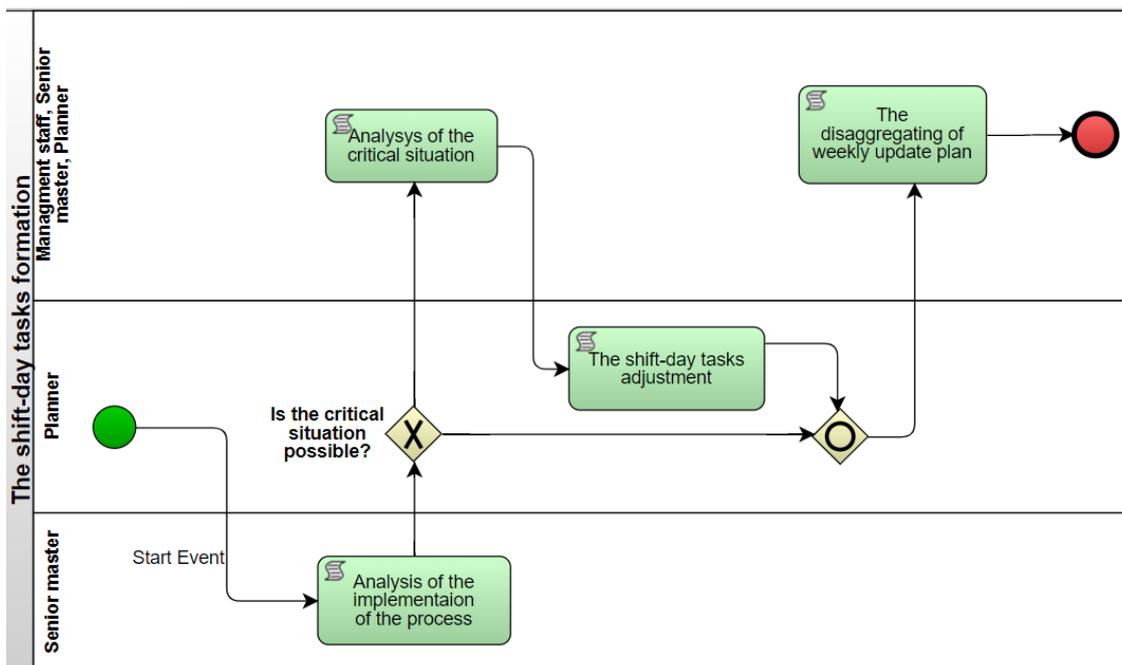


Fig. 3. The fragment of a BPMN model. The shift-day tasks formation

During the simulation, 1500 pieces were used that allow setting the ability of the offered system to cope with the planned load. The duration of the operations process and the probability of the activated output branches of an exclusive gateway are defined based on expert data [12]. The simulation showed that the process duration will be decreased: the average spent for passing by one nomenclature position of all operations of the process will decrease for 3 minutes and 3,8 seconds. The total time for the 1500 positions will make: in the existing process – six hundred hours, in offered – five hundred hours. The difference for 1500 the nomenclature positions will be one hundred hours.

The comparison of results showed that the offered model will allow performing operations on finishing operations management faster than the existing [13].

Conclusion

As part of the interaction of the Department of Automated Management Systems of the Ufa State Aviation Technical University, PJSC “UEC-UMPO” and IPL Consulting there is underway work of forming a structural model of the casting process, developed models of intra-workshop planning (manufacturing execution system level), accounting for the production and support of decision-making in operational management on the methodology of structural modeling and process modeling [14]. Also, the model of the component composition of the alloy charge was developed, in which all reference books are presented as existing ERP Infor LN and newly created. The conducted research demonstrates that the introduction and adaptation of Infor LN in the enterprises of the class of PJSC “UEC-UMPO” is an urgent task.

The need to apply the principles of reengineering business processes to create a single information space of an enterprise is obvious. This makes it possible to adapt the existing system to other conditions. Increase the level of information exchange between all enterprise divisions, which will create a closed loop management loop and will significantly increase the efficiency of using Infor LN. The access of managers and specialists of the enterprise to the necessary reliable information in real-time will increase the quality of management decisions [15].

The applying principle of horizontal relations rationalization will create conditions for the formation of the Uniform Information Space. ERP-system allows quality statistics but using only the ERP system to solve the problem of rejection reduction is impossible. Planning of foundry production in PJSC “UEC-UMPO” is conducted with the CAD system. This system does not allow to realize the finishing operations management. The creation of the UIS (Uniform Information Space) will allow the integration of the data of CAD and ERP systems and to quickly make management decisions in case of changes in production.

The systems integration will allow avoiding errors due to re-enter data and reducing production preparation time.

The double-side data exchange between ERP and CAD systems can be conducted both in real-time and batch mode at regular intervals manually.

Thus, the execution of horizontal communications the principle will allow to reveal of “narrow” places of process and to make management decisions on their elimination.

The described technique is verified by conducting a simulation of the proposed and existing processes with the performing execution of dynamic analysis. The results apply to the PJSC “UEC-UMPO”.

References

1. INFOR: Official site. Available at: <https://www.infor.com/news/ncd-group-embarks-on-digital-vision-with-infor-1>.
2. IPLConsulting: Official site. Available at: <https://iplc.ru/>.
3. Baronov V.V., Kalyanov G.N., Popov Y.I., Rybnikov A.I., Titovskiy I.N. *Avtomatizatsiya upravleniya predpriyatiyem* [Automation of enterprise management]. Moscow: INFRA-M, 2000. 239 p. (In Russ.)
4. Ahmedshin I.T. *Avtomatizatsiya operativnogo planirovaniya i upravleniya liteynym proizvodstvom na osnove sistemnogo modelirovaniya i strukturnoy optimizatsii sostavov shikhity: dis. kand. tekhn. nauk: 05.13.06* [Automation of operational planning and management of casting production based on system modeling and structural optimization of the compositions of the charge. Cand. sci. diss.: 05.13.06]. Ufa: USATU; 2009. 184 p. RGB OD, 61 09-5/2182. (In Russ.)
5. Doroshenko V.S., Tokova O.V. The Examples of Digitalization of Foundry Production: Virtual Engineering, Digital Twin, Additive Technologies. *Control Systems & Computers*. 2020;5:64–69. DOI: 10.15407/csc.2020.05.064
6. Kollanus J., Nieminen M., Orkas J. ERP in Foundries – Towards Optimized Cast Production with Order-Driven DES. In: *Conference: The 68th World Foundry Congress*. Chennai, India, February 2008. DOI: 10.13140/RG.2.1.3569.0969
7. Nieves J., Santos I., Penya Y.K., Brezo F., Bringas P.G. Enhanced Foundry Production Control. In: *Conference: Database and Expert Systems Applications, 21st International Conference, DEXA 2010, Bilbao, Spain, August 30 – September 3, 2010, Proceedings, Part I*; 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-15364-8_15

8. Hammer M., Champy J. Reengineering the corporation: A manifesto for business revolution. Transl. from Engl. Moscow: MIF; 2001. (In Russ.)
9. Blinov A.O., Rudakova O.S., Zakharov I.V., Zakharov V.Ya. *Reinzhiniring biznes-protsessov* [The business process reengineering]. Moscow: Yuniti-Dana; 2014. 344 p. (In Russ.)
10. Kulikov G.G., Hristolubov V.L., Gindullina T.K., Demchenko M.S. Automation of foundry production on machinebuilding enterprise on the basis of its process model. *Vestnik USATU*. 2007;9(4):39–47. (In Russ.)
11. Penya Y.K., Bringas P.G., Zabala A. Advanced fault prediction in high-precision foundry production. In: *Proceedings of the 2008 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics*. 2008. P. 1672–1677. DOI: 10.1109/INDIN.2008.4618372
12. Kovács G., Yussupova N., Rizvanov D. Resource management simulation using multi-agent approach and semantic constraints. *Pollack Periodica*. 2017;12(1):45–58. DOI: 10.1556/606.2017.12.1.4
13. Gindullina T.K., Demchenko M.S., Arslanova A.U. To the question of the application of the principles of business processes reengineering in foundry. In: *DSPTech'2015. Vol. 3*. Ufa: USATU; 2015. P. 91–99.
14. Rechkalov A.V., Gindullina T.K., Dautova O.R., Demchenko M.S., Makarovskii L.I. Optimization model for dynamic scheduling process of titanium moulding. *Automation of control processes*. 2013;3(33):91–97. (In Russ.)
15. Nkomo A., Marnewick C. Improving the success rate of business process re-engineering projects: A business process re-engineering framework // *SA Journal of Information Management*. 2021;23(1):1–11. DOI: 10.4102/sajim.v23i1.1259

Список литературы

1. INFOR: официальный сайт. URL: <https://www.infor.com/news/ncd-group-embarks-on-digital-vision-with-infor-1>.
2. IPLConsulting: официальный сайт. URL: <https://iplc.ru/>.
3. Автоматизация управления предприятием / В.В. Баронов, Г.Н. Калянов, Ю.И. Попов и др. М.: ИНФРА-М, 2000. 239 p.
4. Ахмедшин И.Т. Автоматизация оперативного планирования и управления литейным производством на основе системного моделирования и структурной оптимизации составов шихты: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Уфа: УГАТУ, 2009. 184 с. РГБ ОД, 61 09-5/2182.
5. Doroshenko V.S., Tokova O.V. The Examples of Digitalization of Foundry Production: Virtual Engineering, Digital Twin, Additive Technologies // *Control Systems & Computers*. 2020. No. 5. P. 64–69. DOI: 10.15407/csc.2020.05.064
6. Kollanus J., Nieminen M., Orkas J. ERP in Foundries – Towards Optimized Cast Production with Order-Driven DES // Conference: The 68th World Foundry Congress. Chennai, India, February 2008. DOI: 10.13140/RG.2.1.3569.0969
7. Nieves J., Santos I., Penya Y.K., Brezo F., Bringas P.G. Enhanced Foundry Production Control // Conference: Database and Expert Systems Applications, 21st International Conference, DEXA 2010, Bilbao, Spain, August 30 – September 3, 2010, Proceedings, Part I. 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-15364-8_15
8. Хаммер М., Чампи Д. Реинжиниринг корпорации: манифест революции в бизнесе: пер. с англ. М.: МИФ, 2001.
9. Блинов А.О. Реинжиниринг бизнес-процессов / А.О. Блинов, О.С. Рудакова, И.В. Захаров, В.Я. Захаров. М.: Юнити-Дана, 2014. 344 с.
10. Автоматизация литейного производства на машиностроительном предприятии на основе процессной модели / Г.Г. Куликов, В.Л. Христолюбов, Т.К. Гиндуллина, М.С. Демченко // *Вестник УГАТУ*. 2007. Т. 9, № 4. С. 39–47.
11. Penya Y.K., Bringas P.G., Zabala A. Advanced fault prediction in high-precision foundry production // *Proceedings of the 2008 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics*. 2008. P. 1672–1677. DOI: 10.1109/INDIN.2008.4618372
12. Kovács G., Yussupova N., Rizvanov D. Resource management simulation using multi-agent approach and semantic constraints // *Pollack Periodica*. 2017. Vol. 12, iss. 1. P. 45–58. DOI: 10.1556/606.2017.12.1.4

13. Gindullina T.K., Demchenko M.S., Arslanova A.U. To the question of the application of the principles of business processes reengineering in foundry // DSPTech'2015. Ufa: USATU, 2015. Vol. 3. P. 91–99.

14. Оптимизационная модель оперативного планирования процесса титанового литья / А.В. Речкалов, Т.К. Гиндуллина, О.Р. Даутова и др. // Автоматизация процессов управления. 2013;3(33):91–97.

15. Nkomo A., Marnewick C. Improving the success rate of business process re-engineering projects: A business process re-engineering framework // SA Journal of Information Management. 2021. Vol. 23 (1). P. 1–11. DOI: 10.4102/sajim.v23i1.1259

Information about the authors

Gennady G. Kulikov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Automated Control Systems, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia; gennadyg_98@yahoo.com.

Tamara K. Gindullina, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Automated Control Systems, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia; tamara_ugatu@mail.ru.

Vladimir N. Kapustin, Executive Director, IPL Consulting, Moscow, Russia; Vladimir.Kapustin@iplc.ru.

Marina S. Demchenko, Senior Lecturer of the Department of Automated Control Systems, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia; Analytics department consultant, IPL Consulting, Project office, Ufa, Russia; demchenkoms@mail.ru.

Ravil R. Nabiev, Senior Consultant, IPL Consulting, Project office, Ufa, Russia; ravil.nabiev@iplc.ru.

Информация об авторах

Куликов Геннадий Григорьевич, д-р техн. наук, проф. кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия; gennadyg_98@yahoo.com.

Гиндуллина Тамара Камильевна, канд. техн. наук, доц. кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия; tamara_ugatu@mail.ru.

Капустин Владимир Николаевич, исполнительный директор, ООО «АЙПЛ Консалтинг», Москва, Россия; Vladimir.Kapustin@iplc.ru.

Демченко Марина Сергеевна, старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия; консультант отдела аналитики, ООО «АЙПЛ Консалтинг», Проектный офис, Уфа, Россия; demchenkoms@mail.ru.

Набиев Равиль Раисович, ведущий консультант, ООО «АЙПЛ Консалтинг», Проектный офис, Уфа, Россия; ravil.nabiev@iplc.ru.

The article was submitted 27.06.2022

Статья поступила в редакцию 27.06.2022

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

Automated process control systems

Научная статья
УДК 621.22-546
DOI: 10.14529/ctcr220412

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРЕЦЕДЕНТНОМ УПРАВЛЕНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ НАСОСНЫМ КОМПЛЕКСОМ С УЧЕТОМ КАНАЛА БАЙПАСА

А.Г. Лютов, lutov1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6048-8816>
М.Б. Новоженин, novozhenin.maxim@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9157-9991>
И.К. Шевцов, ilyxa-s007@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5797-8566>
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Аннотация. При прецедентном управлении автоматизированными насосными комплексами необходим учет характеристик динамических процессов с целью уменьшения или полного устранения различных нестационарных гидравлических процессов, в том числе кавитации. В статье рассмотрены условия возникновения в насосных комплексах локальных колебаний гидродинамического характера, способствующих возникновению или активизации указанных нежелательных процессов, с построением динамических моделей на основе метода электроанalogии и применением критериев устойчивости теории автоматического управления. Осуществлено построение математической модели локальных динамических процессов, анализ условий устойчивости и степени колебательности, их численное моделирование. Определение данных условий предоставляет дополнительную информацию для обоснованного выбора прецедентов при автоматизированном управлении насосным комплексом. **Цель исследования:** определение условий устойчивости локальных динамических процессов при прецедентном управлении автоматизированным насосным комплексом с учетом канала байпаса на основе моделирования с использованием метода электроанalogии. **Материалы и методы.** Для проведения исследования были использованы методы математического моделирования, в частности метод электроанalogии, методы теории автоматического управления с использованием аппарата передаточных функций, методы численного моделирования с применением программного комплекса SimInTech. **Результаты.** Осуществлено построение динамической модели насосного комплекса с учетом канала байпаса на основе метода электроанalogии. Это позволило провести анализ устойчивости и степени колебательности процесса перекачивания жидкости с использованием методов теории автоматического управления. Полученные в аналитическом виде условия, находящиеся в зависимости от статических и динамических параметров насосного комплекса, определили границы областей на напорно-расходной характеристике с определенной степенью устойчивости и колебательности динамических процессов. **Заключение.** Результаты исследования позволяют определить условия, при которых в насосных комплексах на основе центробежных насосов, оснащенных каналом байпаса, возникают локальные колебательные процессы, способствующие возникновению или активизации нежелательных гидродинамических процессов. Данные условия позволяют осуществлять формирование и использование базы прецедентов при управлении режимами работы насосных комплексов с учетом фактора колебательности.

Ключевые слова: насосный комплекс, байпас, кавитация, автоматизированная система, прецедентный подход, электроанalogия, динамическая модель, колебательность

Для цитирования: Лютов А.Г., Новоженин М.Б., Шевцов И.К. Моделирование динамических процессов при прецедентном управлении автоматизированным насосным комплексом с учетом канала байпаса // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 119–130. DOI: 10.14529/ctcr220412

Original article
DOI: 10.14529/ctcr220412

SIMULATION OF DYNAMIC PROCESSES DURING PRECEDENT CONTROL OF THE AUTOMATED PUMP SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT THE BYPASS CHANNEL

A.G. Lutov, lutov1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6048-8816>

M.B. Novozhenin, novozhenin.maxim@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9157-9991>

I.K. Shevtcov, ilyxa-s007@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5797-8566>

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract. The precedent management of automated pumping systems requires consideration of the characteristics of dynamic processes in order to reduce or completely eliminate various non-stationary hydraulic processes, including cavitation. The article considers the conditions of local hydrodynamic oscillations in pump complexes, which contribute to the emergence or activation of these undesirable processes, with the construction of dynamic models based on the electric analogy method and the use of stability criteria for the theory of automatic control. A mathematical model of local dynamic processes was built, stability conditions and degree of oscillation were analyzed, and their numerical modeling was carried out. The definition of these conditions provides additional information for the reasonable selection of precedents in the automated control of the pump complex. **Research objective:** Determination of conditions for stability of local dynamic processes in case management of the automated pump system taking into account the bypass channel based on modeling using the electric analogy method. **Materials and methods.** To conduct the study, methods of mathematical modeling were used, in particular, the method of electric analogy, methods of the theory of automatic control using the apparatus of transfer functions, methods of numerical modeling using the SimInTech software complex. **Results.** A dynamic model of the pump system was built taking into account the bypass channel based on the electric analogy method. This allowed an analysis of the stability and degree of vibrancy of the fluid pumping process using methods of automatic control theory. The conditions obtained in analytical form, depending on the static and dynamic parameters of the pump complex, determined the boundaries of the regions on the pressure-flow characteristic with a certain degree of stability and oscillation of dynamic processes. **Conclusion.** The results of the study make it possible to determine the conditions under which local oscillatory processes occur in pumping complexes based on centrifugal pumps equipped with a bypass channel, which contribute to the emergence or activation of undesirable hydrodynamic processes. These conditions make it possible to create and use a base of precedents when controlling the operating modes of pump systems taking into account the oscillation factor.

Keywords: pump complex, bypass, cavitation, automated system, precedent approach, electrical analogy, dynamic model, oscillation

For citation: Lutov A.G., Novozhenin M.B., Shevtcov I.K. Simulation of dynamic processes during precedent control of the automated pump system taking into account the bypass channel. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2022;22(4):119–130. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220412

Введение

При прецедентном управлении автоматизированными насосными комплексами (НК) [1, 2], реализующими технологические процессы перекачивания жидкостей во многих отраслях промышленности, необходим учет условий возникновения в НК нежелательных динамических процессов, в частности колебательных, наличие которых приводит к появлению различного рода нестационарных гидравлических процессов. Среди таких процессов наибольший ущерб вызывает кавитация [3–5], которая служит источником разрушения рабочих органов, шумам, вибрации и пульсациям давления в системе и, как следствие, снижению производительности, уменьшению КПД, повышению износа и уменьшению срока службы НК. Кавитация представляет собой серьезную проблему в связи с трудностью оперативного контроля ее возникновения и обеспечения безкавитационных режимов работы НК [6], которые включают в себя один или несколько насо-

сов, а также всасывающий и напорные трубопроводы. Основное распространение получили НК с центробежными насосами (ЦН) по причине массогабаритных показателей, высокой производительности и способности перекачивать загрязненные среды [7].

В [1, 8] представлены результаты исследования условий возникновения колебательных процессов при автоматизированном управлении НК при помощи прецедентов без учета канала байпаса. Способ регулирования методом байпасирования, путем перепуска части жидкости во всасывающую линию насосов, предоставляет дополнительный канал управления НК с помощью управляемой задвижки. Это увеличивает пространство возможных состояний НК как динамического объекта и, соответственно, расширяет возможности управления и формирования потенциальных прецедентов при выборе рациональных (безкавитационных) режимов его работы.

Определение условий возникновения колебательных процессов в НК для различных способов регулирования, в том числе и методом байпасирования, построение границ колебательной устойчивости и, в конечном итоге, предоставление дополнительной корректирующей информации для обоснованного выбора прецедентов при автоматизированном управлении НК является важной и актуальной задачей.

Напорно-расходная характеристика определяет изменение режима работы НК. Точка пересечения характеристики сети (с увеличением расхода Q происходит увеличение и напора H) и характеристики ЦН (с увеличением расхода уменьшается напор) называется рабочей точкой. Изменение положения рабочей точки приводит к изменению режима работы НК.

С целью исследования динамических процессов в НК на основе методов теории автоматического управления применительно к линейным системам [9] необходима линеаризация НРХ в области рабочей точки. Введем в рассмотрение дифференциальные сопротивления для описания динамических процессов в окрестностях рабочей точки НРХ:

$$R_c = \left. \frac{dH_c}{dQ} \right|_{Q_0} > 0; R_{цн} = \left. \frac{dH_{цн}}{dQ} \right|_{Q_0} < 0,$$

где $H_{цн}$ – напор, развиваемый ЦН; H_c – напор гидравлической сети; Q – расход жидкости в системе; R_c – дифференциальное сопротивление сети; $R_{цн}$ – дифференциальное сопротивление ЦН (рис. 1).

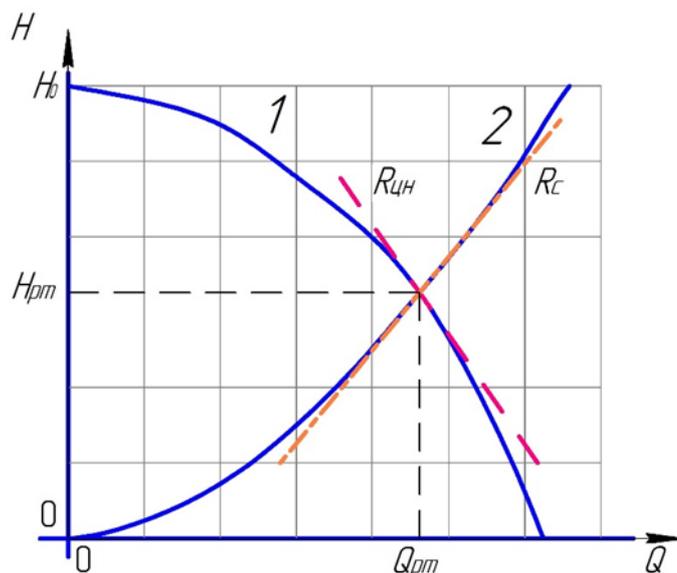


Рис. 1. НРХ ЦН (1) и сети (2)
Fig. 1. Pressure and flow characteristics
of centrifugal pump (1) and network (2)

В случае применения перепускного канала как средства управления режимом работы рассмотрим схему параллельного включения, представленную на рис. 2.

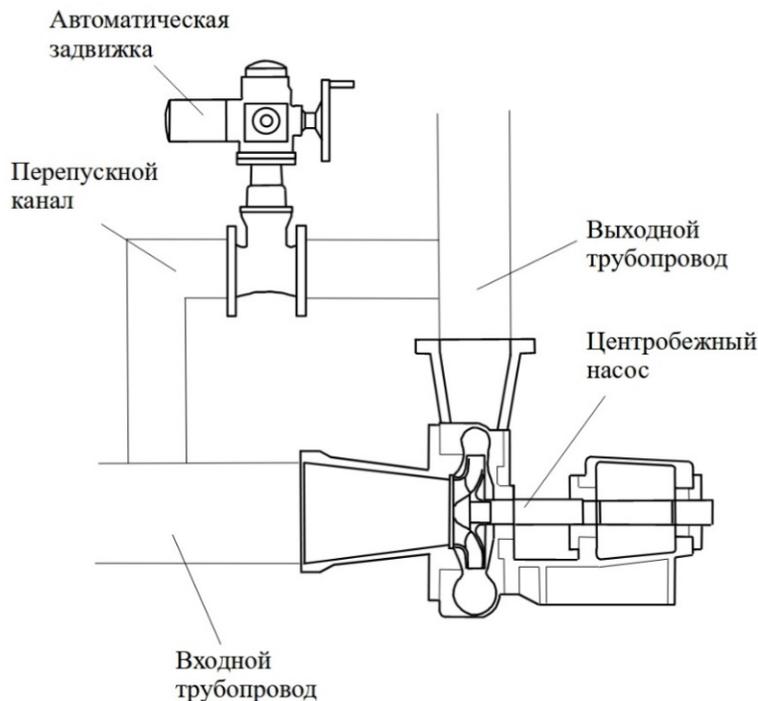


Рис. 2. Схема включения ЦН в НК
Fig. 2. Diagram of the centrifugal pump activation in the pump system

Структурная схема автоматизированной системы управления НК с применением прецедентного подхода [10] представлена на рис. 3.

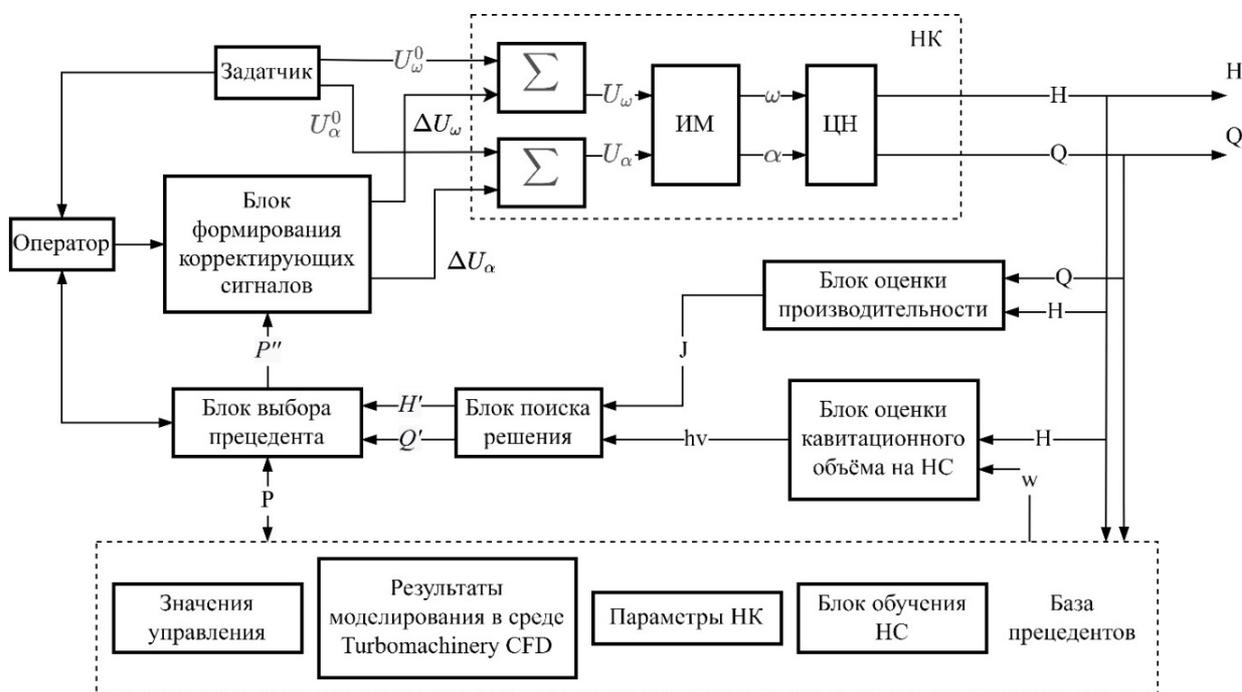


Рис. 3. Структурная схема системы автоматизированного управления НК с применением прецедентного подхода
Fig. 3. Block diagram of the pump system automated control system using the precedent approach

На рис. 3 имеются следующие обозначения: H – напор, развиваемый ЦН; Q – расход, развиваемый ЦН; ω – частота вращения ЦН; α – угол открытия задвижки на перепускном канале;

$h\nu$ – объем кавитации; J – значение критерия оценки отклонения производительности (критерий оценки производительности); P – прецедент; P'' – заключение о пригодности прецедента; w – веса настройки нейронной сети; H', Q' – теоретические значения напора и расхода ЦН в новой рабочей точке; U_ω^0, U_α^0 – управляющие воздействия по частоте вращения и углу открытия задвижки, формируемые задатчиком; $\Delta U_\omega, \Delta U_\alpha$ – корректирующие воздействия по частоте вращения и углу открытия задвижки на перепускном канале соответственно.

Математическое моделирование

Метод электроанalogии [11], который получил широкое распространение также и при моделировании гидравлических процессов в НК [12–14], целесообразно использовать для построения динамической модели процесса перекачивания жидкости с целью анализа возникновения колебательных процессов.

В результате применения данного подхода была получена следующая модель НК (рис. 4).

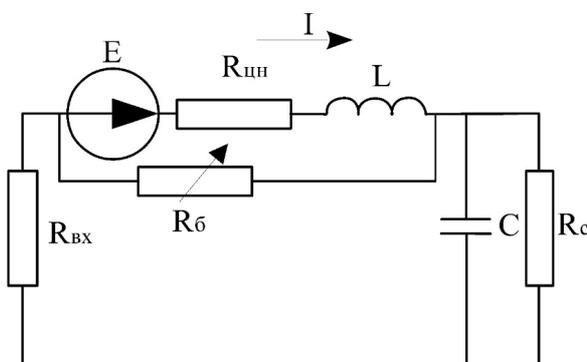


Рис. 4. Модель насосного комплекса,
построенная на основе метода электроанalogии
Fig. 4. Model of the pump complex,
built on the basis of the electric analogy method

На рис. 4: E – электрический эквивалент напора, развиваемого ЦН; I – электрический эквивалент расхода; $R_{\text{С}}, R_{\text{ЦН}}, R_{\text{ВХ}}, R_{\text{Б}}$ – эквиваленты гидравлических дифференциальных сопротивлений сети, центробежного насоса, всасывающего (входного) трубопровода, байпаса с регулируемой задвижкой (соответственно); C – динамический элемент (электрическая емкость), отражающий упругие свойства жидкости и элементов конструкции насосного комплекса; L – динамический элемент (индуктивность), отражающий инерционность потока жидкости [12].

На основании 2-го закона Кирхгофа модель НК примет вид следующего уравнения электрической цепи в комплексной форме:

$$E(j\omega) = I(j\omega) \cdot \left(\frac{\left(R_{\text{ВХ}} + \frac{R_{\text{С}}}{R_{\text{С}}Cj\omega + 1} \right) \cdot R_{\text{Б}}}{R_{\text{ВХ}} + \frac{R_{\text{С}}}{R_{\text{С}}Cj\omega + 1} + R_{\text{Б}}} + R_{\text{ЦН}} + j\omega L \right). \quad (1)$$

Выполнив преобразование Лапласа к операторной форме записи ($p = j\omega$), после арифметических преобразований получим:

$$E(p) = I(p) \cdot \left(\frac{\left(R_{\text{ВХ}} (R_{\text{С}}Cp + 1) + R_{\text{С}} \right) R_{\text{Б}} + (R_{\text{ЦН}} + Lp) \cdot \left((R_{\text{ВХ}} + R_{\text{Б}})(R_{\text{С}}Cp + 1) + R_{\text{С}} \right)}{(R_{\text{ВХ}} + R_{\text{Б}})(R_{\text{С}}Cp + 1) + R_{\text{С}}} \right). \quad (2)$$

Итоговый вид общей передаточной функции:

$$W(p) = \frac{I(p)}{E(p)} = \frac{(R_{\text{ВХ}} + R_{\text{Б}})(R_{\text{С}}Cp + 1) + R_{\text{С}}}{\left(R_{\text{ВХ}} (R_{\text{С}}Cp + 1) + R_{\text{С}} \right) R_{\text{Б}} + (R_{\text{ЦН}} + Lp) \cdot \left((R_{\text{ВХ}} + R_{\text{Б}})(R_{\text{С}}Cp + 1) + R_{\text{С}} \right)}. \quad (3)$$

Анализ устойчивости динамических процессов

Устойчивость динамической системы, описываемой в окрестностях рабочей точки НРХ передаточной функцией (3), определяется параметрами ее знаменателя – характеристического полинома:

$$p^2 [CLR_c (R_{вх} + R_б)] + p [C (R_б R_{вх} R_c + R_{цн} R_c (R_{вх} + R_б)) + L (R_{вх} + R_б + R_c)] + [R_б R_{вх} + R_б R_c + R_{цн} R_{вх} + R_{цн} R_б + RR_{цн} R_c]. \quad (4)$$

К системам второго порядка применим критерий необходимого и достаточного условия устойчивости – положительность всех коэффициентов характеристического уравнения [9]. Коэффициент при p^2 является безусловно положительным. Тогда для устойчивости системы необходима положительность остальных коэффициентов характеристического полинома.

Условие устойчивости для среднего коэффициента:

$$C (R_б R_{вх} R_c + R_{цн} R_c (R_{вх} + R_б)) + L (R_{вх} + R_б + R_c) > 0. \quad (5)$$

Предполагая, что значение L , отражающее инерционность потока жидкости, достаточно мало, то вторым слагаемым в (5) можно пренебречь:

$$C (R_б R_{вх} R_c + R_{цн} R_c (R_{вх} + R_б)) > 0. \quad (6)$$

Кроме этого, если учесть, что $C > 0$, то условие (5) примет следующий вид:

$$R_б R_{вх} R_c + R_{цн} R_c (R_{вх} + R_б) > 0. \quad (7)$$

Значения напоров ЦН и сети определим по графикам НРХ [15]:

$$H_{цн} = H_0 - aQ^2; \quad H_c = bQ^2. \quad (8)$$

В этом случае значения дифференциальных сопротивлений ЦН и сети будут:

$$R_{цн} = \frac{dH}{dQ} = -2aQ; \quad R_c = \frac{dH}{dQ} = 2bQ, \quad (9)$$

а значения коэффициентов:

$$a = \frac{H_0 - H_{цн}}{Q^2}; \quad b = \frac{H_c}{Q^2}. \quad (10)$$

Учитывая то, что в рабочей точке $H_{цн} = H_c = H$, получим следующее неравенство:

$$H > H_0 - \frac{1}{2} \frac{R_б R_{вх}}{R_{вх} + R_б} Q. \quad (11)$$

При $R_б = \infty$ (байпас закрыт):

$$H > H_0 - \frac{R_{вх}}{2} Q. \quad (12)$$

Условие (11) определяет колебательную границу устойчивости и выделяет области НРХ различной степени колебательности гидравлических процессов НК в окрестности рабочей точки (рис. 5). Область, расположенная выше границы устойчивости, соответствует устойчивым процессам, ниже – неустойчивым («в малом»).

Положительность значений свободного члена характеристического уравнения (4) передаточной функции исследуемой системы обеспечивается условием

$$R_c R_б + R_c R_{цн} + R_б R_{цн} + R_{вх} R_б + R_{вх} R_{цн} > 0. \quad (13)$$

Полагая для удобства выкладок, что $R_б = k(R_c + R_{вх})$, где $0 < k < \infty$, получим неравенство

$$(1+k)R_{цн} + k(R_c + R_{вх}) > 0. \quad (14)$$

Используя, аналогично вышеизложенному, полученные ранее выражения (9), (10), и с учетом того, что $H_{цн} = H_c = H$, получим:

$$H > \frac{H_0}{2} - \frac{k}{1+k} \cdot \frac{R_{вх} Q}{4}. \quad (15)$$

Условие (15) определяет аperiodическую границу устойчивости и соответствующие области НРХ (рис. 6). Области, расположенные выше данных границ, будут областями устойчивости, и, соответственно, наоборот: области, расположенные ниже данных границ, будут областями неустойчивости.

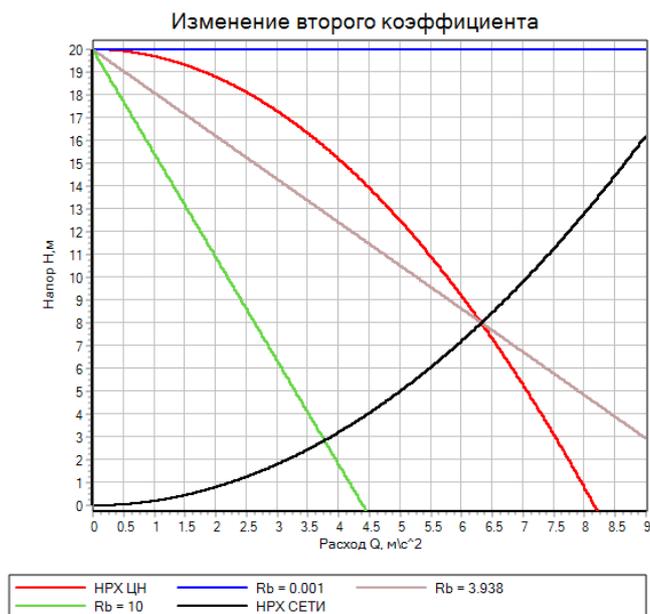


Рис. 5. Напорно-расходная характеристика центробежного насоса с колебательными границами устойчивости при различных значениях сопротивления байпаса R_b

Fig. 5. Pressure and flow characteristics of centrifugal pump with oscillatory stability limits at different values of bypass resistance R_b

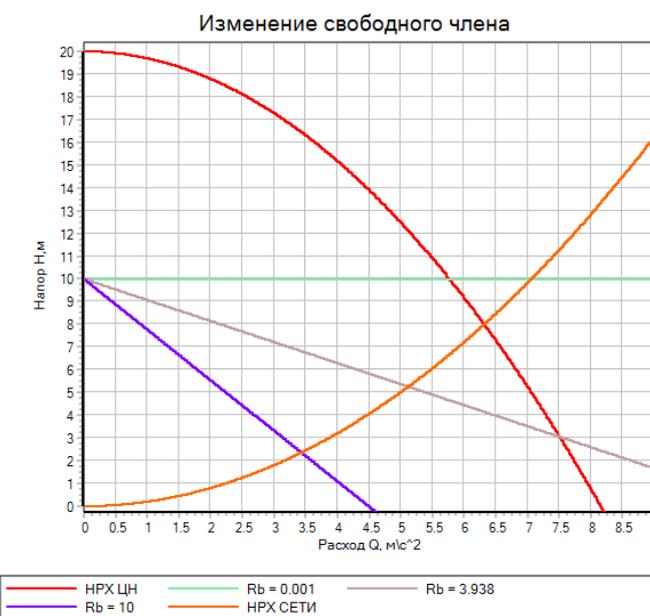


Рис. 6. НРХ центробежного насоса с аperiodическими границами устойчивости при различных значениях сопротивления байпаса R_b

Fig. 6. HP centrifugal pump with aperiodic stability limits at different values of bypass resistance R_b

Анализ степени колебательности динамических процессов

Приведем передаточную функцию (3) к обобщенному виду передаточной функции второго порядка с учетом полинома числителя и соответственно:

$$W(p) = \frac{I(p)}{E(p)} = \frac{b_1 p + b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0} = \frac{\frac{b_0}{a_0} \left(\frac{b_1}{b_0} p + 1 \right)}{\frac{a_2}{a_0} p^2 + \frac{a_1}{a_0} p + 1} = \frac{K (T_1 p + 1)}{T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1}, \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} b_0 &= R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}} + R_{\text{С}}; \\ b_1 &= R_{\text{С}}C(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}}) \end{aligned} \quad (17)$$

– коэффициенты числителя передаточной функции;

$$\begin{aligned} a_0 &= R_{\text{Г}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{С}}) + R_{\text{ЦН}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}} + R_{\text{С}}); \\ a_1 &= R_{\text{С}}C(R_{\text{BX}}R_{\text{Г}} + R_{\text{ЦН}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}})) + L(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}} + R_{\text{С}}); \\ a_2 &= R_{\text{С}}CL(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}}) \end{aligned} \quad (18)$$

– коэффициенты знаменателя передаточной функции.

Учитывая преобразования

$$\begin{aligned} K &= \frac{b_0}{a_0}; \quad T_1 = \frac{b_1}{b_0}; \\ T_2^2 &= \frac{a_2}{a_0}; \quad T_2 = \sqrt{\frac{a_2}{a_0}}; \\ 2\xi T_2 &= \frac{a_1}{a_0}; \quad \xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 \cdot a_2}}, \end{aligned} \quad (19)$$

получим следующие значения параметров передаточной функции (16):

$$\begin{aligned} K &= \frac{R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}} + R_{\text{С}}}{R_{\text{Г}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{С}}) + R_{\text{ЦН}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}} + R_{\text{С}})}; \\ T_1 &= \frac{R_{\text{С}}C(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}})}{R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}} + R_{\text{С}}}; \\ T_2 &= \sqrt{\frac{R_{\text{С}}CL(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}})}{R_{\text{Г}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{С}}) + R_{\text{ЦН}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}} + R_{\text{С}})}}; \\ \xi &= \frac{R_{\text{С}}C(R_{\text{BX}}R_{\text{Г}} + R_{\text{ЦН}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}})) + L(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}} + R_{\text{С}})}{2\sqrt{(R_{\text{Г}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{С}}) + R_{\text{ЦН}}(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}} + R_{\text{С}})) \cdot R_{\text{С}}CL(R_{\text{BX}} + R_{\text{Г}})}}. \end{aligned} \quad (20)$$

Как известно, условие $0 < \xi < 1$ соответствует области колебательных, а $1 \leq \xi$ – области аperiodических динамических процессов [9]. Данные условия с учетом полученного выражения для ξ из (20) позволяют при необходимости выделить на НРХ области, соответствующие разной степени колебательности гидравлических процессов в НК, а также области аperiodических процессов.

Отметим, что условием нахождения коэффициента демпфирования ξ в области действительных чисел является положительность подкоренного выражения для его определения (см. (20)).

Также, принимая, что $H_{\text{ЦН}} = H_{\text{С}} = H$ в рабочей точке, выразим $R_{\text{С}}$ и $R_{\text{ЦН}}$ через коэффициенты напорно-расходной характеристики:

$$R_{\text{С}} = 2b\sqrt{\frac{H_0}{a+b}}; \quad (21)$$

$$R_{\text{ЦН}} = -2a\sqrt{\frac{H_0}{a+b}}. \quad (22)$$

Численное моделирование

Был выполнен численный эксперимент, расчетные параметры которого представлены в таблице, с использованием динамической модели в виде передаточной функции (16) для иллюстрации характера переходных процессов в НК в различных областях.

Параметры для расчетов динамической модели
Parameters for dynamic model calculations

Параметр	1-й эксперимент	2-й эксперимент	3-й эксперимент	4-й эксперимент
a	0,3			
b	0,2			
R_b	0,001	3,93873	3,94	10
L	0,0013			
C	0,1			
$R_{вх}$	100			

Результаты численного моделирования динамических процессов в окрестности рабочей точки НХР с использованием программного пакета SimInTech для различных областей колебательности представлены на рис. 7.

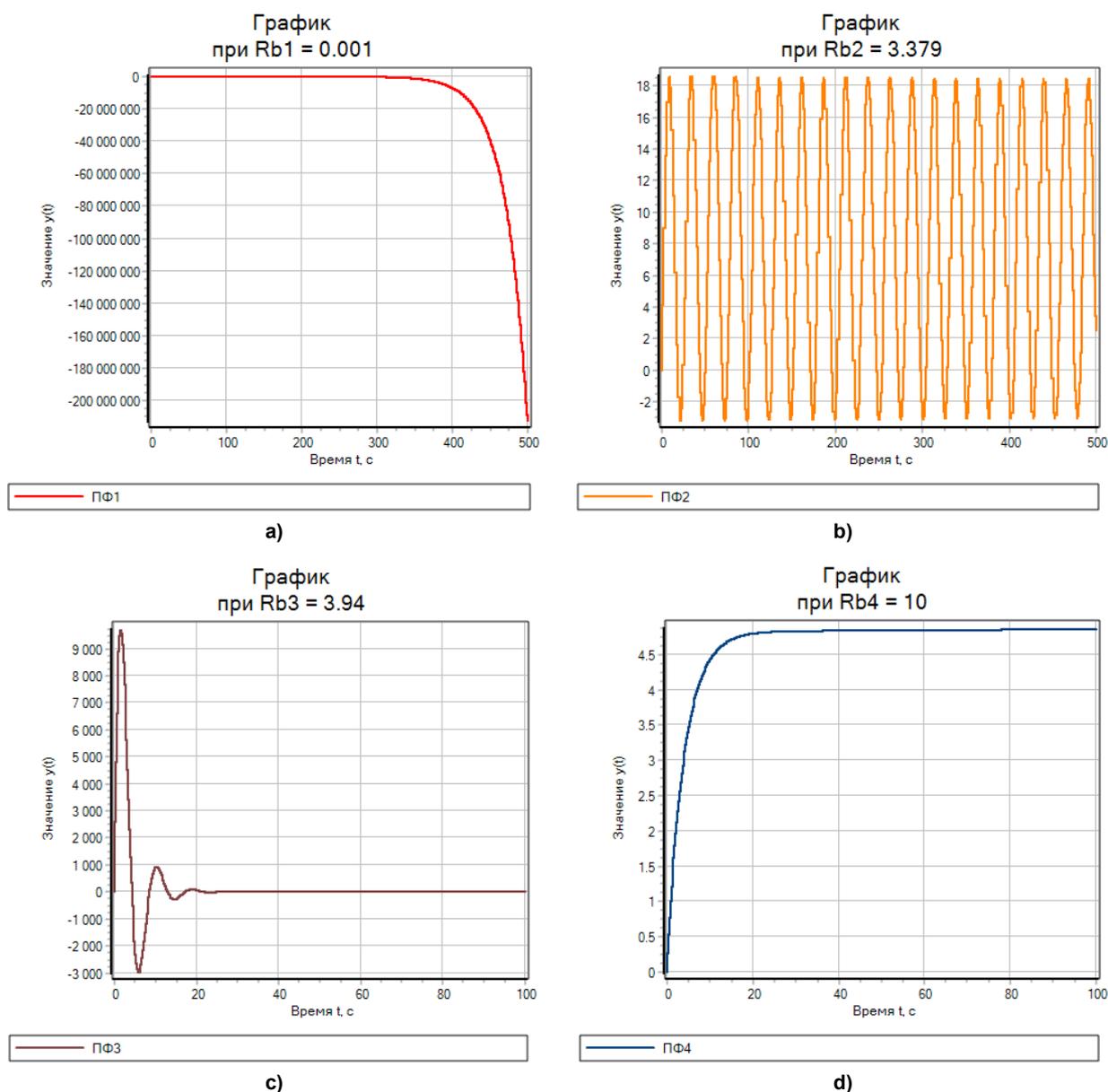


Рис. 7. Графики переходных процессов при различных условиях моделирования:
а – в области аperiodической неустойчивости; б, в – в области устойчивых колебательных процессов; д – аperiodических (монотонных) процессов
Fig. 7. Transient plots under different modeling conditions: а – in the field of aperiodic instability; б, в – in the field of stable oscillatory processes; д – aperiodic (monotonic) processes

Обсуждение результатов

Структура динамической модели, выстраиваемой по методу электроанalogии, определяется схемой включения ЦН в НК. Анализ полученной динамической модели дает возможность на НРХ НК разграничить области, характеризующиеся разной степенью устойчивости и колебательности динамических процессов в окрестности рабочей точки НРХ. Это предоставляет дополнительную информацию при выборе прецедентов при автоматизированном управлении НК.

Для численного моделирования динамических процессов необходима идентификация параметров модели, таких как L , C , $R_{вх}$, что может быть реализовано в том числе экспериментально-расчетным путем.

Уточнение упомянутых границ областей НРХ возможно с использованием доверительных интервалов, при этом границы соответствующих областей будут иметь форму секторов.

Заключение

Полученные в процессе исследования результаты позволяют определить условия, при которых в НК на основе ЦН, оснащенных каналом байпаса, возникают колебательные процессы, способствующие возникновению или активизации нежелательных гидродинамических процессов. При этом данные условия находятся в зависимости от параметров НК – статических и динамических.

Для построения динамической модели НК использован метод электроанalogии. Это позволило провести анализ устойчивости и степени колебательности процесса перекачивания жидкости с использованием методов теории автоматического управления. Соответствующие аналитические зависимости и неравенства определили границы областей на НРХ с определенной степенью устойчивости, а также колебательности динамических процессов в НК.

Проведенные исследования осуществлены применительно к схеме включения ЦН в НК с использованием канала байпаса, что развивает методологию построения систем автоматизированного управления НК с применением прецедентного подхода, учетом характеристик динамических процессов с целью уменьшения или полного устранения различных нестационарных гидравлических процессов, в том числе кавитации.

Список литературы

1. Лютов А.Г., Новоженин М.Б., Огородов В.А. Анализ условий возникновения колебательных процессов в системах топливоподачи авиационной техники // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2022. № 1. С. 4–10.
2. Антонов В.В., Конев К.А., Куликов Г.Г. Трансформация модели системы поддержки принятия решений для типовых ситуаций с применением интеллектуальных и аналитических методов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2021. Т. 21, № 3. С. 14–25. DOI: 10.14529/ctcr210302
3. Карелин В.Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. М.: Машиностроение, 1975. 336 с.
4. Лютов А.Г., Новоженин М.Б., Хуснутдинов Д.З. Метод диагностики насосного комплекса на основе моделирования режимов работы в условиях возникновения кавитации // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15, № 1. С. 160–164.
5. Лютов А.Г., Новоженин М.Б. Методология автоматизированного контроля и управления режимами работы насосного комплекса в условиях возникновения кавитации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22, № 9. С. 468–474. DOI: 10.17587/mau.22.468-474
6. Истомин Д.А., Столбов В.Ю., Платон Д.Н. Экспертная система оценки технического состояния узлов электроцентробежных насосов на основе продукционного представления знаний и нечеткой логики // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, № 1. С. 133–143. DOI: 10.14529/ctcr200113
7. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с.
8. Лютов А.Г., Новоженин М.Б., Огородов В.А. Исследование условий возникновения колебательных процессов при автоматизированном управлении насосными комплексами на основе прецедентов // Вестник УГАТУ. 2021. Т. 25, № 4. С. 101–110. DOI: 10.54708/19926502_2021_25494101

9. Певзнер Л.Д. Теория систем управления: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Лань, 2013. 424 с.
10. Люттов А.Г., Новоженин М.Б. Автоматизированная система диагностики и управления режимами работы насосного комплекса при нестационарных процессах // Вестник УГАТУ. 2018. Т. 22, № 3. С. 114–123.
11. Люттов А.Г., Новоженин М.Б. Моделирование и диагностика нестационарных режимов автоматизированных насосных комплексов // Вестник УГАТУ. 2018. Т. 22, № 1. С. 113–120.
12. Goppelt F., Hieninger T., Schmidt-Vollus R. Modeling centrifugal pump systems from a system-theoretical point of view // 18th International Conference on Mechatronics – Mechatronika (ME). 2018. P. 1–8.
13. Чикуров Н.Г. Синтез математических моделей технических систем методом электроаналогий // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 12, № 2. С. 156–165.
14. Сердюк А.А., Коренькова Т.В. Характеристики физической модели насосного комплекса с учетом кавитационных процессов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2012. № 4 (20). С. 57–62.
15. Новоженин М.Б., Люттов А.Г., Озеров М.Ю. Экспериментальное исследование режимов работы автоматизированного насосного комплекса при нестационарных процессах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2018. Т.18, № 1. С. 110–116. DOI: 10.14529/ctcr180113

References

1. Lyutov A.G., Novozhenin M.B., Ogorodov V.A. Analysis of conditions of oscillation onset in aircraft fuel supply systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatcionnaya tekhnika*. 2022;(1):4–10. (In Russ.)
2. Antonov V.V., Konev K.A., Kulikov G.G. Transformation of the decision support system model for standard situations using intellectual and analytical methods. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(3):14–25. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210302
3. Karelin V.Ya. *Kavitatsionnyye yavleniya v tsentrobezhnykh i osevykh nasosakh* [Cavitation Phenomena in Centrifugal and Axial Pumps]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ.; 1975. 336 p. (In Russ.)
4. Lutov A.G., Novozhenin M.B., Husnutdinov D.Z. The diagnostic method of pumping complex simulation-based modes of operation in terms of cavitation. *Petroleum engineering = Neftegazovoe delo*. 2017;15(1):160–164. (In Russ.)
5. Lutov A.G., Novozhenin M.B. Methodology of automated monitoring and control of pump complex operation modes in conditions of cavitation occurrence. *Mechatronics, automation, control = Mekhatronica, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2021;22(9):468–474. (In Russ.) DOI: 10.17587/mau.22.468-474
6. Istomin D.A., Stolbov V.Yu., Platon D.N. Expert system for assessment of technical condition of electric centrifugal pump assemblies based on productive presentation of knowledge and fuzzy logic. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2020;20(1):133–143. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200113
7. Leznov B.S. *Energoberezheniye i reguliruyemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh* [Energy Saving and Adjustable Drive in Pumping and Blowing Plants]. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 2006. 360 p. (In Russ.)
8. Lutov A.G., Novozhenin M.B., Ogorodov V.A. Research of the conditions for the occurrence of vibratory processes in the automated control of pumping complexes based on precedents. *Vestnik UGATU*. 2021;25(4):101–110. (In Russ.) DOI: 10.54708/19926502_2021_25494101
9. Pevzner L.D. *Teoriya sistem upravleniya: uchebnoye posobiye* [Theory of Control Systems: Textbook]. 2nd ed., rev. and additional. St. Petersburg: Lan'; 2013. 424 p. (In Russ.)
10. Lutov A.G., Novozhenin M.B. Automated diagnostic and control system works of the pump complex under non-stationary processes. *Vestnik UGATU*. 2018;22(3):114–123. (In Russ.)
11. Lutov A.G., Novozhenin M.B. Modeling and diagnostics of non-stationary regimes automated pumping complexes. *Vestnik UGATU*. 2018;22(1):113–120. (In Russ.)

12. Goppelt F., Hieninger T., Schmidt-Vollus R. Modeling centrifugal pump systems from a system-theoretical point of view. In: *18th International Conference on Mechatronics – Mechatronika (ME)*; 2018. P. 1–8.

13. Chikurov N.G. Synthesis of mathematical models of technical systems by electroanalogical method. *Vestnik UGATU*. 2009;12(2):156–165. (In Russ.)

14. Serduk A.A., Korenkova T.V. Characteristics of the physical model of the pumping complex with cavitation processes. *Elektromehanichni i Energozberigajuchi Sistemi*. 2012;20(4):57–62. (In Russ.)

15. Novozhenin M.B., Lyutov A.G., Ozerov M.Yu. Experimental study of operating modes of the automated pump complex under non-stationary processes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2018;18(1):110–116. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr180113

Информация об авторах

Лютов Алексей Германович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автоматических систем, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия; lutov1@mail.ru.

Новоженин Максим Борисович, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры автоматических систем, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия; novozhenin.maxim@yandex.ru.

Шевцов Илья Константинович, ассистент кафедры автоматических систем, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия; ilyxa-s007@rambler.ru.

Information about the authors

Alexey G. Lutov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Automatic Systems, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia; lutov1@mail.ru.

Maxim B. Novozhenin, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Automatic Systems, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia; novozhenin.maxim@yandex.ru.

Ilya K. Shevtsov, Assistant of the Department of Automatic Systems, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia; ilyxa-s007@rambler.ru.

Статья поступила в редакцию 11.09.2022

The article was submitted 11.09.2022

Краткие сообщения Brief reports

Краткое сообщение
УДК 004.92 + 621.3
DOI: 10.14529/ctcr220413

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРОСОВОЙ ГРОЗОЗАЩИТЫ ДВУХЦЕПНОЙ ЛЭП КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ 110 кВ В SIMULINK

П.В. Плехов, onim@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5025-9342>
А.В. Затонский, z xenon2000@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>
И.С. Долгополов, demarsel@mail.ru

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Березниковский филиал, Березники, Россия*

Аннотация. В статье рассматривается проблема повышения качества грозозащиты за счет более точного расчета её параметров. В качестве средства защиты выбран защитный трос. Актуальность задачи обусловлена необходимостью повышения качества и бесперебойности энергоснабжения в современных условиях. В качестве объекта исследования выбран участок реальной сети электрических соединений напряжением 110 кВ в виде воздушных линий на опорах ПБ-100-8, к которым подключены разнородные потребители. Экспериментально установлено, что потребители оказывают друг на друга взаимное влияние. В этих условиях затруднительно применить традиционные методы расчета грозозащиты. **Цель исследования** – анализ влияния проводника грозотроса на переходные процессы реальной двухцепной воздушной линии электроснабжения. **Материалы и методы.** В пакете Simulink разработана имитационная модель взаимодействия элементов системы электроснабжения, выключателей и потребителей, воспроизводящая различные режимы работы сети: холостой ход, работу под нагрузкой, короткое замыкание. Ограничение перенапряжений в модели не учитывается в целях исследования. Недостающие данные получены из сторонних источников и с помощью программы Google Earth. Адекватность модели доказана путем сравнения результатов с экспериментальными данными, в том числе расчетами взаимного влияния потребителей. **Результаты.** Разработан сценарий моделирования, предусматривающий несколько переключений и коротких замыканий в сети. Проанализировано влияние грозозащитного троса в различных режимах работы. Путем анализа осциллограмм сети изучено взаимное влияние проводников разных цепей высоковольтной линии. Показано, что это влияние существенное, и его необходимо учитывать при расчете параметров средств грозозащиты. Оценено обратное влияние грозозащиты на электрическую сеть. **Заключение.** Разработанная модель может использоваться для широкого круга сетей 100 кВ, оснащенных средствами грозозащиты. В данном случае подтверждена эффективность выбранного защитного троса. Важным частным выводом из результатов моделирования является заключение о незначительной (менее 1 %) потере мощности в сети из-за организации тросовой грозозащиты.

Ключевые слова: электроснабжение, моделирование, грозозащита, Simulink

Для цитирования: Плехов П.В., Затонский А.В., Долгополов И.С. Компьютерное моделирование тросовой грозозащиты двухцепной ЛЭП класса напряжения 110 кВ в Simulink // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 131–140. DOI: 10.14529/ctcr220413

COMPUTER SIMULATION OF CABLE LIGHTNING PROTECTION OF 110-kV VOLTAGE DOUBLE-CIRCUIT PTL BY SIMULINK

P.V. Plekhov, onim@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5025-9342>

A.V. Zatonskiy, zxenon2000@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>

I.S. Dolgoplov, demarsel@mail.ru

Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia

Abstract. The article deals with the problem of improving the quality of lightning protection due to a more accurate calculation of its parameters. A protective cable was chosen as a means of protection. The urgency of the task is due to the need to improve the quality and uninterrupted power supply in modern conditions. As an object of study, a section of a real network of electrical connections with a voltage of 110 kV in the form of overhead lines on PB-100-8 supports, to which heterogeneous consumers are connected, was chosen. It has been experimentally established that consumers have mutual influence on each other. Under these conditions, it is difficult to apply traditional methods for calculating lightning protection. **The aim** of the study is to analyze the effect of the ground wire conductor on the transient processes of a real double-circuit overhead power supply line. **Materials and methods.** In the Simulink package, a simulation model of the interaction of the elements of the power supply system, switches and consumers has been developed, reproducing various network operation modes: idle, load, short circuit. The overvoltage limitation in the model is not taken into account for research purposes. The missing data was obtained from third-party sources and using the Google Earth program. The adequacy of the model was proved by comparing the results with experimental data, including calculations of the mutual influence of consumers. **Results.** A simulation scenario has been developed that provides for several switching and short circuits in the network. The influence of a lightning protection cable in various operating modes is analyzed. By analyzing the oscillograms of the network, the mutual influence of conductors of different circuits of a high-voltage line was studied. It is shown that this influence is significant, and it must be taken into account when calculating the parameters of lightning protection. The reverse effect of lightning protection on the electrical network is estimated. **Conclusion.** The developed model can be used for a wide range of 100 kV networks equipped with lightning protection devices. In this case, the effectiveness of the selected security cable has been confirmed. An important private conclusion from the simulation results is the conclusion about an insignificant (less than 1 %) power loss in the network due to the organization of a cable lightning protection.

Keywords: power supply, modeling, lightning protection, Simulink

For citation: Plekhov P.V., Zatonskiy A.V., Dolgoplov I.S. Computer simulation of cable lightning protection of 110-kV voltage double-circuit PTL by Simulink. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(4):131–140. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220413

Введение

Воздушные линии электропередачи (ВЛ) требуют защиты от грозовых перенапряжений [1, 2]. Одним из средств защиты от таких перенапряжений является грозозащитный трос. Несмотря на широко известные недостатки такого метода [3], он широко применяется на практике. Принятие решения об использовании именно грозотроса с учетом характеристик конкретной ВЛ кроме опыта использования может основываться на результатах моделирования линии [4]. В качестве инструмента для построения подобных моделей хорошо зарекомендовали себя разные модули (тулбоксы) среды MATLAB [5, 6], в частности Simulink [7].

Целью данной работы является анализ влияния проводника грозотроса на переходные процессы реальной двухцепной ВЛ. Для этого создадим в Simulink модель и проведем имитационный эксперимент из двух этапов:

1-й этап – моделирование двухцепной ВЛ 110 кВ без грозозащиты;

2-й этап – моделирование двухцепной ВЛ 110 кВ с грозозащитой по всей длине ВЛ.

Проанализируем влияние наличия грозотроса на переходные процессы ВЛ в разных режимах работы, также обратим внимание на взаимное влияние проводников разных цепей ВЛ. В процессе работы оценим эффективности выбранной конструкции опор и грозозащиты, чтобы исследовать возможность её применения.

Рассматриваемый участок сети электрических соединений 35–110 кВ (с объектами электроэнергетики) ПО БЭС филиала ОАО «МРСК Урала» – «Пермэнерго» расположен в Пермском крае и включает в себя:

- 1) источник напряжения 110 кВ;
- 2) выключатель 110 кВ;
- 3) линию электропередачи (ЛЭП) 110 кВ;
- 4) устройство искусственного создания короткого замыкания;
- 5) выключатель 110 кВ;
- 6) трансформаторную подстанцию ПС 110/35/6 кВ.

Анализ зарубежных [8, 9] и отечественных [10, 11, 12] источников показывает, что каждый элемент схемы в энергосистеме оказывает влияние на смежные элементы энергосистемы, поэтому важно исследовать эти явления. Это поможет откорректировать работу энергосистемы, найти слабые места или даже отказаться от применения выбранного способа грозозащиты [13].

Протяженность линии ВЛ 110 кВ Бумажная – Красновишерск составляет 96 км от г. Соликамска до г. Красновишерска Пермского края. На своем протяжении ВЛ имеет 3 отпайки: ПС Губдор, ПС Озерная, ПС Гежская. Линия электропередачи является двухцепной. Это означает что на одной опоре подвешиваются сразу две цепи ВЛ 110 кВ:

- ВЛ 110 кВ Бумажная – Красновишерск I цепь;
- ВЛ 110 кВ Бумажная – Красновишерск II цепь.

Материалы и методы

На всем протяжении линии преобладают опоры типа ПБ110-8. Именно их габаритные размеры будем использовать для расчета. Двухцепная промежуточная железобетонная опора ПБ110-8 предназначена для организации ВЛ по прямому участку. Внешний вид и габаритные размеры показаны на рис. 1.

Основные технические данные провода и грозотроса приведены в табл. 1.

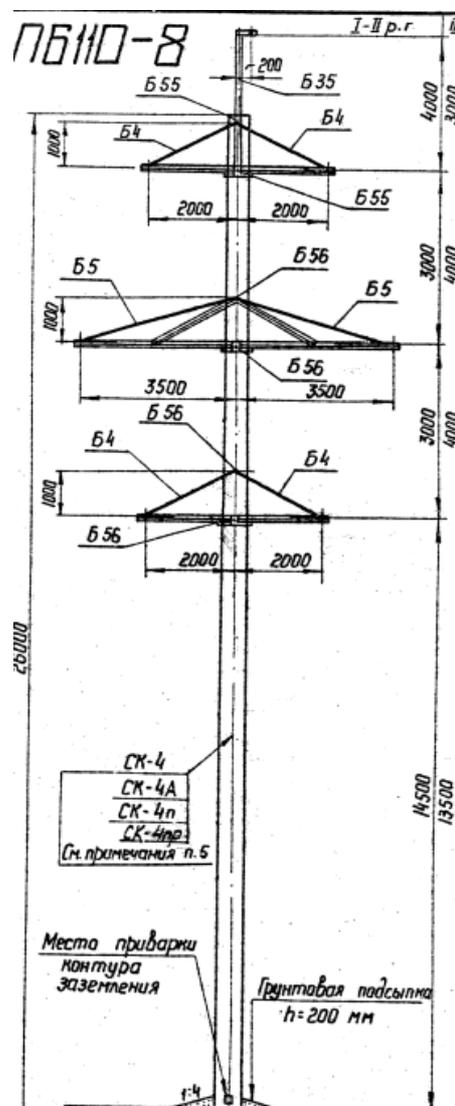


Рис. 1. ПБ110-8
Fig. 1. PБ110-8

Основные технические данные провода и грозотроса

Таблица 1

Basic technical data of the wire and lightning protection cable

Table 1

Наименование	Провод АС 150/19	Грозотрос ГТК 20- 0/90-12,1/104
Диаметр, мм	16,8	12,1
Площадь сечения алюминиевой части, мм ²	147,78	0
Площадь сечения стальной части, мм ²	18,81	86,34
Допустимый ток, А	450	–
Электрическое сопротивление 1 км провода постоянному току, Ом	0,2046	0,999

Из [10] следует, что T/D 0,5 задает сплошную жилу. Тогда подставим данные из табл. 1 в формулу:

$$\frac{T}{D} = \frac{147,78 \cdot 0,5}{147,78 + 18,81} = 0,44. \quad (1)$$

Согласно [14], возьмем среднее значение сопротивления заземляющего устройства порядка 15 Ом. Недостающие данные по расстояниям до мест подключения отпаек получены с помощью Google Earth (рис. 2).

При моделировании ВЛ 110 кВ учтем наличие горозотроса. Согласно схеме фазировки по опорам ВЛ 110 кВ, получим следующее расположение фаз на опоре в направлении от ПС Бумажная к ПС Красновишерск (рис. 3).

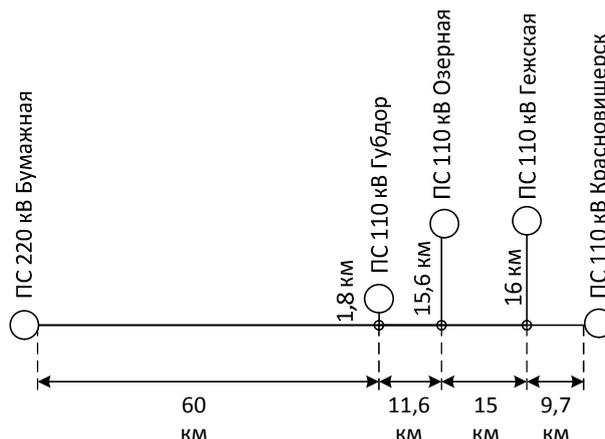


Рис. 2. Недостающие данные по расстояниям до мест подключения отпаек
Fig. 2. Missing data on the distances to the connection points

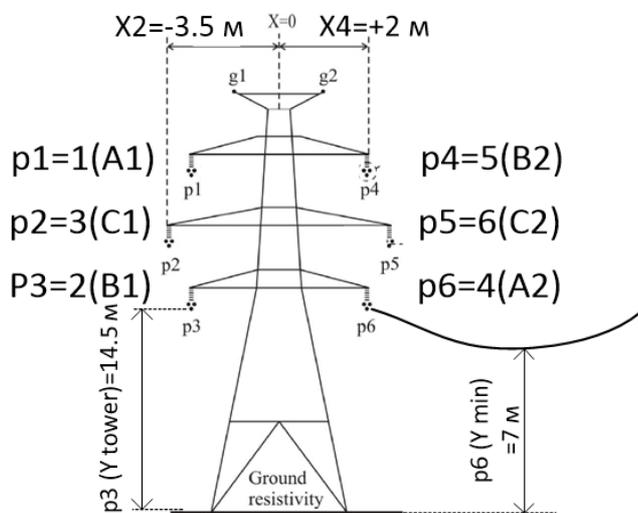


Рис. 3. Расположение фаз двух цепной ВЛ 110 кВ на опоре
Fig. 3. The arrangement of phases of a double-chain 110 kV high-voltage line on the transmission tower

Тогда вставим все полученные данные в PowerGui вкладка Compute RLC Line Parameters [15], как показано это на рис. 4.

Модель участка сети 110 кВ, показанная на рис. 5, предназначена для проведения эксперимента по сценарию моделирования, указанному в табл. 2. Модель сложная, реализует работу трансформаторов и двух цепной ВЛ с нелинейными характеристиками, при различных режимах сети: холостой ход $T1(2)$, работа под нагрузкой, короткое замыкание. Правая часть модели реализует работу понижающей станции 110 кВ Красновишерск, далее ПС, согласно выданной фазировке на ПС выполнен «крест» (смещение фаз), это связано с конструктивными особенностями ПС. Данная модель в исследовательских целях выполнена без ограничителей перенапряжений, далее ОПН.

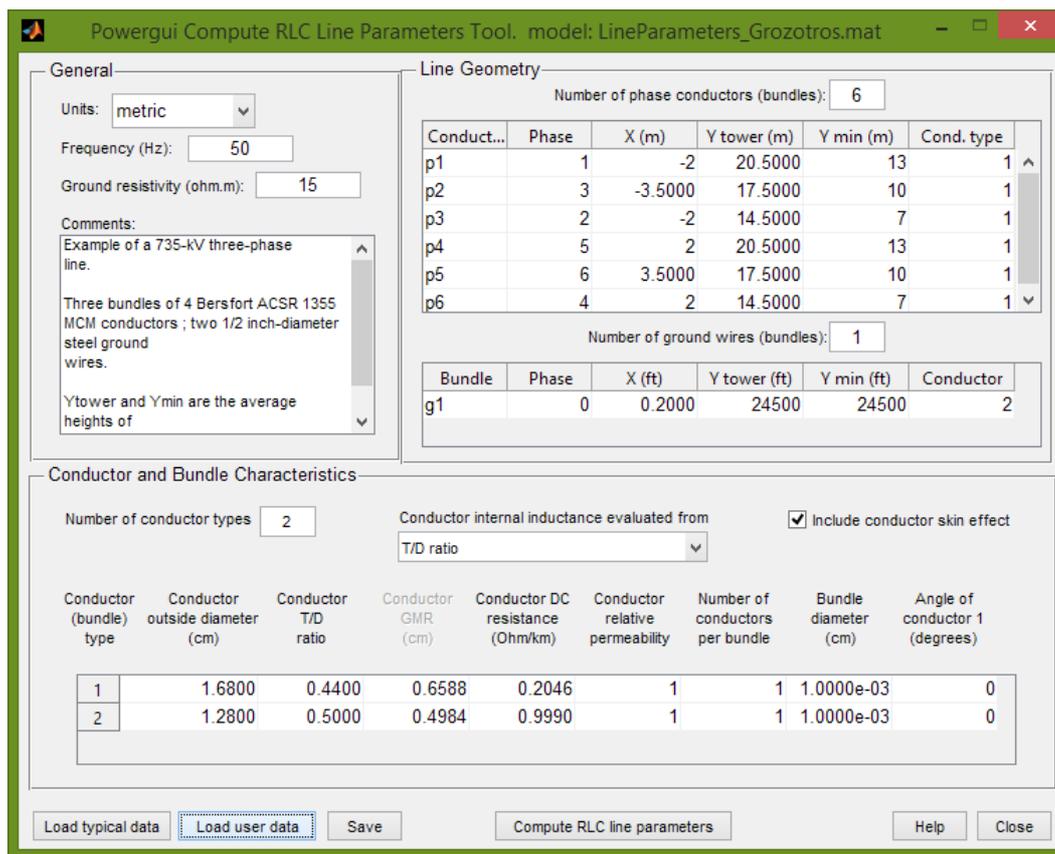


Рис. 4. Настройка виртуальной модели ВЛ 110 кВ вкладка Compute RLC Line Parameters
Fig. 4. Setting up a virtual model of a 110 kV high-voltage line tab "Computer RLC Line Parameters"

Сценарий моделирования

Таблица 2

Simulation scenario

Table 2

Время, с	Обозначение	Наименование
0,05	QW1	Включается выключатель 110 кВ. Подается напряжение на ВЛ 110 кВ Бумажная–Красновишерск 1-я цепь. Линия устанавливается под напряжение
0,3	QW2	Включается выключатель 110 кВ. Подается напряжение на ВЛ 110 кВ Бумажная–Красновишерск 2-я цепь. Линия устанавливается под напряжение
0,5	QW3	Включается выключатель 110 кВ. Включается трансформатор Т1 на холостой ход
2,2	QW4	Включается выключатель 35 кВ. Включается нагрузка № 1 по стороне среднего напряжения, трансформатор Т1 выходит на максимальный рабочий режим
2,5	QW5	Включается выключатель 110 кВ. Включается трансформатор Т2 на холостой ход
4,2	QW6	Включается выключатель 35 кВ. Включается нагрузка № 2 по стороне среднего напряжения, трансформатор Т2 выходит на максимальный рабочий режим
4,5–4,6	КЗ1	Создается однофазное короткое замыкание на землю на 86 км на фазе А ВЛ 110 кВ цепь 1
4,8–5,0	КЗ2	Создается двухфазное короткое замыкание на землю на 60 км ВЛ 110 кВ цепь 1 на фазах А и В
5,1–5,25	КЗ3	Создается двухфазное короткое замыкание на землю на 60 км ВЛ 110 кВ цепь 2 на фазах В и С

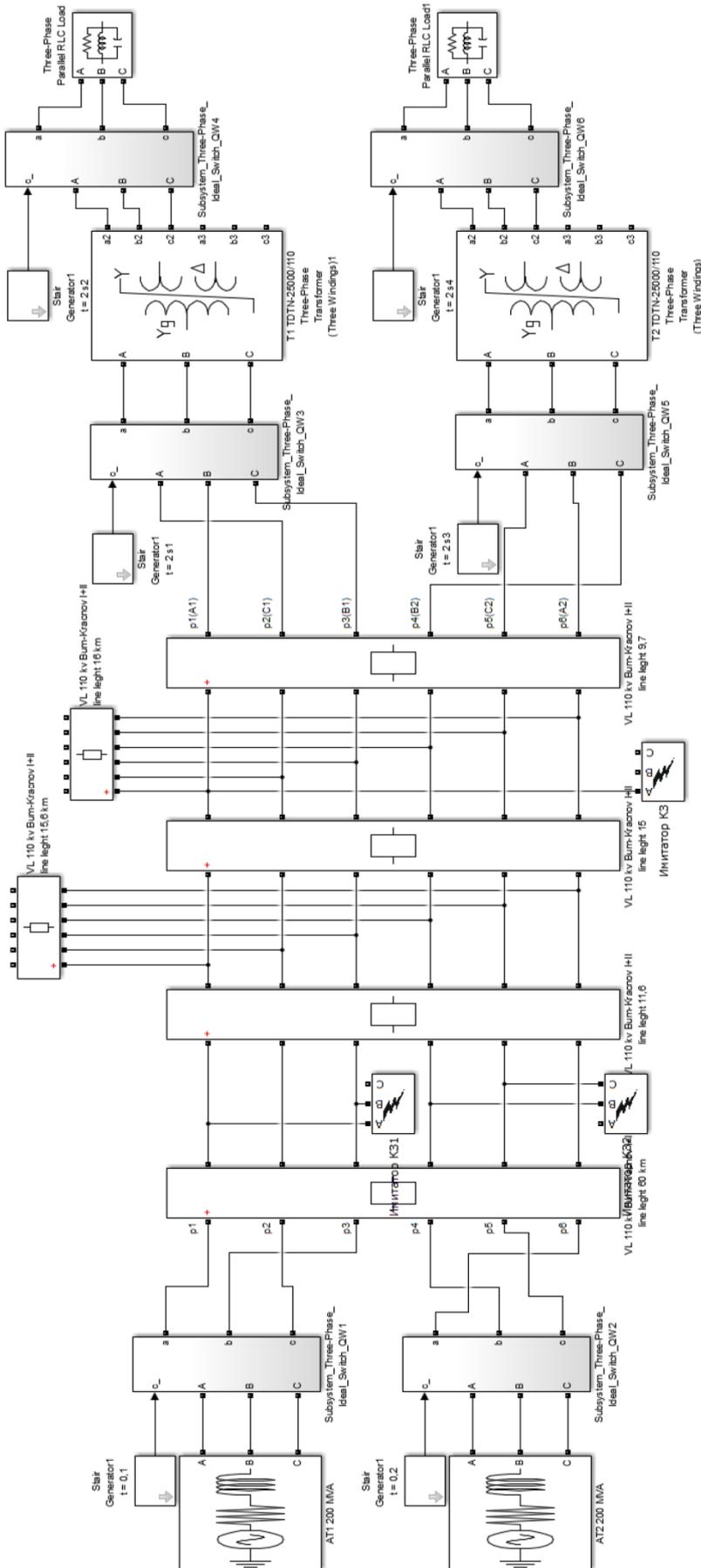


Рис. 5. Модель участка сети 110 кВ от ПС 220 кВ Бумажная до ПС 110 кВ Красновишерск
Fig. 5. 110 kV Network section model from 220 kV Bumazhnaya Substation to 110 kV Krasnovishersk Substation

Обсуждение

Сценарий моделирования приведен в табл. 2. Сценарий одинаков как для ВЛ без грозотроса, так и для ВЛ с грозотросом.

Осциллограммы токов и напряжений ВЛ 110 кВ Бумажная – Красновишерск цепь 1 и 2 показаны на рис. 6. Из осциллограмм следует, что практически любые изменения тока на ВЛ 110 кВ цепь 1 приводят к небольшому изменению напряжений и токов на ВЛ 110 кВ цепь 2.

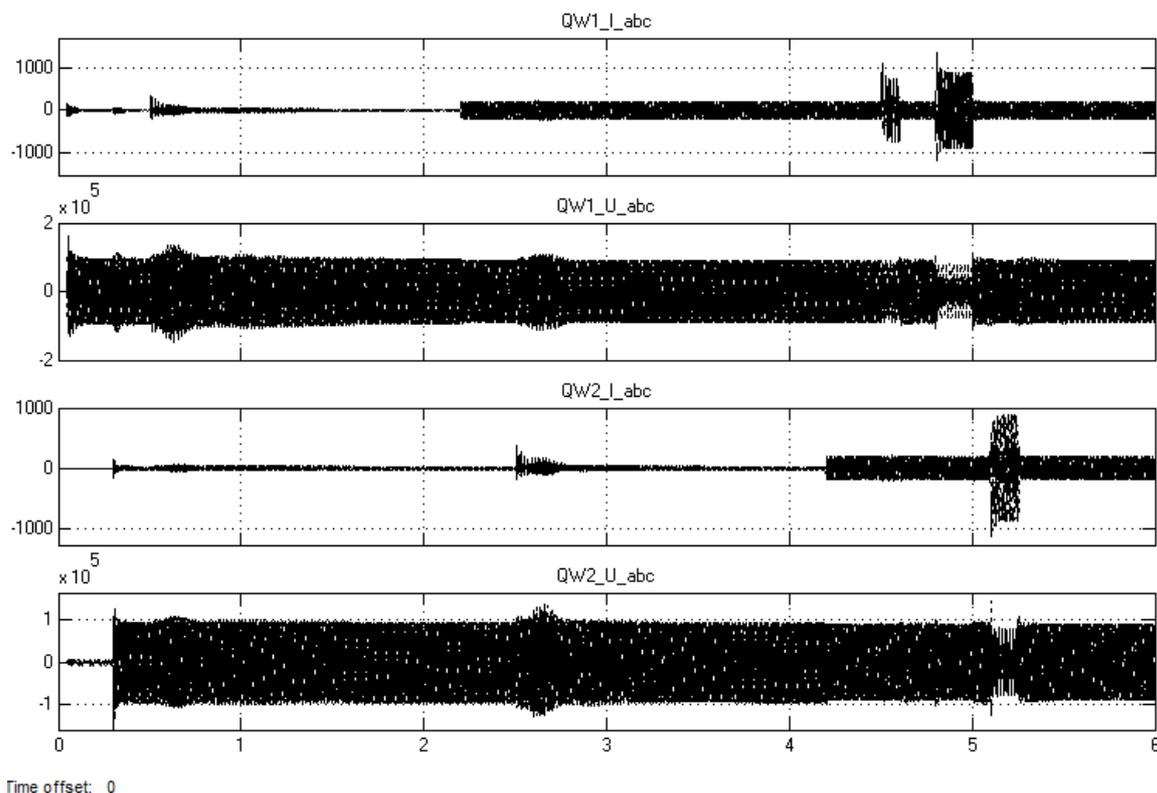


Рис. 6. Осциллограммы токов и напряжений ВЛ 110 кВ Бумажная – Красновишерск цепь 1 и 2
Fig. 6. Oscillograms of currents and voltages of the 110 kV high-voltage line
Bumazhnaya – Krasnovishersk circuit 1 and 2

Результаты

Во втором этапе эксперимента изменим настройки блока ВЛ, добавим в настройки грозотрос, как это показано на рис. 4. Сведем полученные данные в табл. 3.

Данные двух этапов эксперимента

Таблица 3

Data from two stages of the experiment

Table 3

Наименование	Ток, А		Отклонение, %
	Модель без грозотроса	Модель с грозотросом на 100 % длины	
ВЛ цепь 1 без нагрузки	35,9	36,1	0,557
Бросок тока намагничивания T1	390	393	0,769
ВЛ цепь 1 с нагрузкой	195,6	196,5	0,460
ВЛ цепь 1 при КЗ	1353	1353,5	0,037
ВЛ цепь 2 без нагрузки	36,2	36,4	0,552
Бросок тока намагничивания T2	393,8	394,2	0,102
ВЛ цепь 2 с нагрузкой	191,8	192,4	0,313
ВЛ цепь 2 при КЗ	1200,4	1201,4	0,083

Заключение

Анализ изменения токов и напряжений осциллограммы на рис. 6, полученных в процессе моделирования (см. табл. 2), доказал, что любые изменения на одной цепи ВЛ влияют на характеристики второй цепи двухцепной ВЛ.

Результаты проведения двухэтапного эксперимента по конструкции ВЛ с грозотросом и без него, как показано в табл. 3, доказывают то, что наличие грозотроса оказывает минимальное влияние на параметры ВЛ, например, по току в разных режимах работы влияние менее 1 %. Следовательно, потери мощности, возникающие в процессе наведения ЭДС в грозотросе, невелики.

Полученные данные доказывают эффективность выбранной конструкции опор ПБ110-8 и применение на ней грозозащиты в данной конкретной конфигурации ВЛ.

Список литературы

1. Килин С.В., Яковлев А.О. Способы защиты оборудования от грозовых перенапряжений // Материалы XXIII Международной научно-производственной конференции «Инновационные решения в аграрной науке – взгляд в будущее». 2019. С. 110–111.
2. Панова Е.А., Альбрехт А.Я. Уточненные удельные электрические параметры двухцепных ЛЭП 110 кВ для дистанционного определения места повреждения // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 4 (33). С. 35–40. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40
3. Гиясова С.А. Исследование факторов, влияющих на решение об отказе от тросовой защиты на ВЛ 110–500 кВ // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл., Москва, 15–16 марта 2018 года. М.: ООО «Центр полиграфических услуг «РАДУГА», 2018. С. 1111.
4. Çakıl T., Carlak H.F., Özen Ş. Modeling of power network system of the high voltage substation: a simulation study // International Journal of Engineering & Applied Sciences. 2015. Vol. 7, iss. 3. P. 39–57. DOI: 10.24107/IJEAS.251253
5. Затонский А.В. Моделирование технологического участка обогащательной фабрики в пакете MATLAB // Обогащение руд. 2014. № 4 (352). С. 49–54.
6. Zatonkiy A., Bazhenov R., Beknazarova S. Advantages of freeware-based simulation tools for technical and technological modeling // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2021. P. 786–790. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446186
7. Бильфельд Н.В., Володина Ю.И. Моделирование электрических систем и систем управления в современных пакетах MATLAB // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, № 1. С. 27–38. DOI: 10.14529/ctcr200103
8. Tarko R., Gajdzica J., Nowak W., Szyra W. Comparative Analysis of High-Voltage Power Line Models for Determining Short-Circuit Currents in Towers Earthing Systems // Energies. 2021, Vol. 14. P. 4729. DOI: 10.3390/en14164729
9. Fahmani L., Garfaf J., Boukhdar K., Benhadou S., Medromi H. Modelling of very high voltage transmission lines inspection's quadrotor // SN Applied Sciences. 2020. Vol. 2. P. 1425. DOI: 10.1007/s42452-020-03222-y
10. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
11. Костюченко Л.П. Имитационное моделирование систем электроснабжения в программе MATLAB. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2012. 215 с.
12. Анохин Б.А. Анализ расположения фаз двухцепной линии на основе уравнений в фазных координатах // XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Новосибирск, 2020. С.11–12.
13. Затонский А.В., Уфимцева В.Н. Разработка объектных средств имитационного и много-агентного моделирования производственных процессов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2018. № 4. С. 56–62. DOI: 10.24143/2072-9502-2018-4-56-62
14. Глава 2.5. Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ // Правила устройства электроустановок. Новосибирск: Нормативка, 2020. 462 с.
15. A Modelling of High Voltage Transmission Line by Using MATLAB Simulation / A. Ansari, S. Mishra, H.H. Ansari, P.A. Kulkarni // International Journal of Engineering Research & Technology. 2018. Vol. 7, iss. 02. P. 129–133. DOI: 10.17577/ijertv7is020046

References

1. Kilin S.V., Yakovlev A.O. [Ways to protect equipment from lightning overvoltages]. *Materialy XXIII Mezhdunarodnoy nauchno-proizvodstvennoy konferentsii "Innovatsionnyye resheniya v agrarnoy nauke – vzglyad v budushcheye"*; 2019. P. 110–111. (In Russ.)
2. Panova E.A., Al'brekht A.Ya. [Specified Per-unit Parameters of Double-circuit 110 kV Overhead Lines for Distant Fault Location]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* 2016;4(33):35–40. (In Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40
3. Giyasova S.A. [Study of factors influencing the decision to abandon cable protection on 110–500 kV overhead lines]. In: *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika*. Moscow: RADUGA Publ.; 2018. P. 1111. (In Russ.)
4. Çakil T., Carlak H.F., Özen Ş. Modeling of power network system of the high voltage substation: a simulation study. *International Journal of Engineering & Applied Sciences*. 2015;7(3):39–57. DOI: 10.24107/IJEAS.251253
5. Zatonskiy A.V. Concentrating plant processing section modeling in MATLAB package. *Obogashcheniye rud*. 2014;4(352):49–54. (In Russ.)
6. Zatonskiy A., Bazhenov R., Beknazarova S. Advantages of freeware-based simulation tools for technical and technological modeling. In: *2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*; 2021. P. 786–790. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446186
7. Bilfeld N.V., Volodina Yu.I. Modeling of Electrical Systems and Control Systems by Modern MATLAB Packages. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2020;20(1):27–38. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200103
8. Tarko R., Gajdzica J., Nowak W., Szpyra W. Comparative Analysis of High-Voltage Power Line Models for Determining Short-Circuit Currents in Towers Earthing Systems. *Energies*. 2021;14:4729. DOI: 10.3390/en14164729
9. Fahmani L., Garfaf J., Boukhdir K., Benhadou S., Medromi H. Modelling of very high voltage transmission lines inspection's quadrotor. *SN Applied Sciences*. 2020;2:1425. DOI: 10.1007/s42452-020-03222-y
10. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK Press; St. Petersburg: Piter; 2008. 288 p. (In Russ.)
11. Kostyuchenko L.P. *Imitatsionnoye modelirovaniye sistem elektrosnabzheniya v programme MATLAB* [Simulation modeling of power supply systems in the MATLAB program]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University; 2012. 215 p. (In Russ.)
12. Anokhin B.A. [Analysis of the Location of the Phase Double Circuit Lines Based on Equations in Phase Coordinates]. In: *XVII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Sovremennyye tekhnika i tekhnologii"*. Novosibirsk; 2020. P. 11–12. (In Russ.)
13. Zatonskiy A.V., Ufimtceva V.N. Design of object oriented software to multi-agent modeling of enterprise processes. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika*. 2018;4:56–62. (In Russ.)
14. *Glava 2.5. Vozdushnyye linii elektroperedachi napryazheniyem vyshe 1 kV* [Chapter 2.5. Overhead power lines with voltage above 1 kV]. In: *Pravila ustroystva elektroustanovok* [Rules for the installation of electrical installations]. Novosibirsk: Normativka; 2020. 462 p. (In Russ.)
15. Ansari A., Mishra S., Ansari H.H., Kulkarni P.A. A Modelling of High Voltage Transmission Line by Using MATLAB Simulation. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2018;7(02):129–133. DOI: 10.17577/ijertv7is020046

Информация об авторах

Плехов Павел Владимирович, канд. техн. наук, доц. кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; onim@gambler.ru.

Затонский Андрей Владимирович, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; zhenon@narod.ru.

Долгополов Игорь Сергеевич, магистрант кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; demarsel@mail.ru.

Information about the authors

Pavel V. Plekhov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; onim@rambler.ru.

Andrey V. Zatonkiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; zxenon@narod.ru.

Igor S. Dolgopolov, Master's Student of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; demarsel@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 20.06.2022

The article was submitted 20.06.2022

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАНДЕМИИ НА ДИНАМИКУ ЧИСЛЕННОСТИ НАСЕЛЕНИЯ ОРЕНБУРГСКОЙ ОБЛАСТИ

И.П. Болодурина¹, prmat@mail.osu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0096-2587>

Е.Л. Борщук², be@orgma.ru

И.Г. Воробьев¹, ivanexplay2000@gmail.com

Л.С. Гришина¹, grishina_ls@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2752-7198>

¹ Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

² Оренбургский государственный медицинский университет, Оренбург, Россия

Аннотация. Прогнозируемая численность населения и её динамика являются одними из основополагающих характеристик, необходимых для проведения адекватной региональной политики. В зависимости от демографических данных могут быть приняты или отклонены рассматриваемые инфраструктурные, промышленные, сельскохозяйственные, образовательные и другие проекты как на региональном, так и на муниципальном уровнях. Предсказываемая общенациональная демографическая динамика может также качественно влиять на принимаемые государством цели и характер их исполнения. В связи с продолжающейся пандемией COVID-19 особенно актуальным является развитие методов моделирования демографической динамики, позволяющих учитывать эпидемиологическую обстановку и оценивать значимость её влияния. **Цель исследования.** Разработать модель популяционной динамики в условиях пандемии. Количественно оценить влияние пандемии на динамику смертности по Оренбургской области. Исследовать среднюю ожидаемую продолжительность жизни населения в условиях пандемии. **Материалы и методы.** Для построения численных прогнозов и идентификации функциональных параметров использованы методы регрессионного анализа, в частности, метод линейной регрессии. Кроме того, использованы методы многомерной оптимизации, численного дифференцирования и интегрирования, а также численные методы решения гиперболических задач оптимального управления. Исследование выполнено в предположении, что динамика смертности по Оренбургской области подчиняется классическому закону Гомпертца. Для нахождения начального распределения численности населения использован метод градиентного спуска Adam. **Результаты.** Оценка интегральной характеристики свидетельствует об адекватности построенной демографической модели. Разработанная модель популяционной динамики в условиях пандемии позволяет учитывать и количественно оценивать влияние пандемии на демографическую динамику. Кроме того, представленная модель обеспечивает глобальное качество прогноза с ошибкой не более 1,5 %. **Заключение.** Результаты, полученные в ходе проведенного исследования, подтверждают ухудшение средней ожидаемой продолжительности жизни в период пандемии. Кроме того, влияние внешних факторов на динамику смертности у мужчин сильнее и затрагивает более широкий возрастной диапазон. Преимуществом предложенной модели является использование только базовых, общедоступных демографических данных, что облегчает её применение.

Ключевые слова: COVID-19, популяционная динамика, средняя ожидаемая продолжительность жизни, задача преследования, гиперболическая задача оптимального управления первого порядка

Для цитирования: Количественная оценка влияния пандемии на динамику численности населения Оренбургской области / И.П. Болодурина, Е.Л. Борщук, И.Г. Воробьев, Л.С. Гришина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 141–150. DOI: 10.14529/ctcr220414

QUANTITATIVE EVALUATION OF THE PANDEMIC IMPACT ON POPULATION DYNAMICS OF THE ORENBURG REGION

*I.P. Bolodurina*¹, prmat@mail.osu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0096-2587>

*E.L. Borshchuk*², be@orgma.ru

*I.G. Vorobyov*¹, ivanexplay2000@gmail.com

*L.S. Grishina*¹, grishina_ls@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2752-7198>

¹ Orenburg State University, Orenburg, Russia

² Orenburg State Medical University, Orenburg, Russia

Abstract. The predicted population size and its dynamics are one of the fundamental characteristics necessary for an adequate regional policy. Depending on demographic data, considered infrastructure, industrial, agricultural, educational and other projects can be accepted or rejected, both at the regional and municipal levels. The predicted national demographic dynamics can also qualitatively influence the goals adopted by the state and the nature of their implementation. In connection with the ongoing COVID-19 pandemic, it is especially relevant to develop methods for modeling demographic dynamics that allow taking into account the epidemiological situation and assessing the significance of its impact. **Aim.** Develop a model of population dynamics in a pandemic. To quantitatively assess the impact of the pandemic on the dynamics of mortality in the Orenburg oblast. Explore the change in average life expectancy during a pandemic. **Materials and methods.** Regression analysis methods, in particular, the linear regression method, were used to construct numerical forecasts and identify functional parameters. In addition, methods of multidimensional optimization, numerical differentiation and integration, as well as numerical methods for solving hyperbolic optimal control problems are used. The study was carried out under the assumption that the dynamics of mortality in the Orenburg region obeys the classical Gompertz law. To find the initial population distribution, the Adam gradient descent method was used. **Results.** The evaluation of the integral characteristic indicates the adequacy of the constructed demographic model. The developed model of population dynamics in the conditions of a pandemic makes it possible to take into account and quantify the impact of the pandemic on demographic dynamics. In addition, the presented model provides global forecast quality with an error of no more than 1,5%. **Conclusion.** The results obtained in the course of the study confirm the deterioration of average life expectancy during the pandemic. In addition, the influence of external factors on the dynamics of mortality in men is stronger and affects a wide age range. The advantage of this model is the use of only basic, publicly available demographic data, which facilitates its application.

Keywords: COVID-19, population dynamics, average life expectancy, pursuit task, first-order hyperbolic optimal control problem

For citation: Bolodurina I.P., Borshchuk E.L., Vorobyov I.G., Grishina L.S. Quantitative evaluation of the pandemic impact on population dynamics of the Orenburg region. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(4):141–150. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220414

Введение

Прогнозируемая численность населения и её динамика являются одними из основополагающих характеристик, необходимых для проведения адекватной региональной политики. В зависимости от демографических данных могут быть приняты или отклонены рассматриваемые инфраструктурные, промышленные, сельскохозяйственные, образовательные и другие проекты как на региональном, так и на муниципальном уровнях [1–4]. Предсказываемая общенациональная демографическая динамика может также качественно влиять на принимаемые государством цели [5–8] и характер их исполнения.

Однако помимо непосредственно прогнозирования крайне важной задачей является оценка влияния неординарных ситуаций на демографическую динамику для выбора интенсивности реакционных мер. А также построение стратегий принятия тех или иных решений для обеспечения

достижения заранее определённых демографических показателей. Описанная выше задача является особенно актуальной в условиях продолжающейся пандемии COVID-19, в которых возникает потребность в развитии методов моделирования демографической динамики, позволяющих учитывать эпидемиологическую обстановку и оценивать значимость её влияния.

В рамках данной работы построена модель оптимального управления динамикой численностью населения. Кроме того, исследовано влияние пандемии COVID-19 на динамику численности населения Оренбургской области посредством данной модели.

1. Обзор исследований

Исследованиями в области предиктивной аналитики факторов COVID-19 и популяционной динамики занимаются ученые по всему миру. Рассмотрим работы, применяющие теорию оптимального управления к пандемии COVID-19 и к популяционной динамике.

В статье [9] исследуется влияние различных немедикаментозных стратегий для предотвращения распространения вируса и смертности от COVID-19. В данной работе изучалось влияние различных стратегий контроля как зависящих от времени вмешательств с использованием математического моделирования и подхода оптимального управления, чтобы установить их вклад в динамическую передачу заболевания COVID-19.

Авторами исследования [10] предлагается двухэтапная модель эпидемии с динамическим управлением, используемая для описания распространения коронавирусной инфекции в Китае. Исследованы стратегии управления, минимизирующие затраты на управление и обеспечивающие нормальное функционирование общества. Также рассмотрена зависимость стационарного режима модели от её параметров.

В статье [11] исследуются нелинейные зависимые от возраста модели популяционной динамики. Представленные модели благодаря своей нелинейности позволяют описывать динамику численности населения, конкурирующего за некоторый ресурс (пространство, пропитание), в отличие от моделей, основанных на законе Мальтуса.

В рамках работы [12] исследуется взаимозависимая динамика численности населения. Построенная в работе модель позволяет описывать популяции, динамика отдельных поколений которых зависит от совокупной динамики численности всей популяции.

Таким образом, наиболее распространённым подходом к моделированию динамики пандемии являются модели, оценивающие распространение коронавирусной инфекции с течением времени, но не изменение структуры населения в условиях пандемии. Среди рассмотренных методов моделирования популяционной динамики представлены разнообразные модели, тем не менее не учитывающие явно эпидемиологическую обстановку.

2. Модель оптимального управления численностью населения

Для оценки влияния COVID-19 на динамику численности населения Оренбургской области опишем модель преследования:

$$J(u) \rightarrow \min \tag{1}$$

при условии:

$$\begin{cases} \partial_\tau N + \partial_t N = -f_1(\tau, t, u_1(\tau, t))N + f_2(\tau, t, u_2(\tau, t)), \\ N(0, t) = N_0(t), \quad t \geq 0, \\ N(\tau, 0) = \tilde{\gamma}(\tau) \int_A^B N(\tau, t) dt, \end{cases} \tag{2}$$

где J – функционал качества; $\partial_\tau, \partial_t$ – частные производные по соответственным переменным; N – численность населения возраста t в момент времени τ ; $N_0(t)$ – начальное распределение численности; A, B – границы репродуктивного возраста; f_1 – управляемая интенсивность смертности; f_2 – управляемая миграция; $\tilde{\gamma}(\tau)$ – коэффициент воспроизводства популяции.

Использовать данную модель можно как для исследования влияния неординарных событий, так и для построения стратегий демографической политики.

Например,

– если $f_1 = h(t) \cdot g(u_1(\tau))$ и $J(u) = \frac{A}{2} \int_0^{t_{\max}} (N_0(t) - N(T, t))^2 dt + B \int_0^T u_1^2(\tau) d\tau$, где u_1 – капиталовложения в здравоохранение; g – зависимость изменения интенсивности смертности от

вложений в медицину, построенная на статистических данных других регионов; h – интенсивность смертности в рассматриваемом регионе; J – сумма отклонения численности в момент времени T от начальной израсходованных средств с некоторыми весовыми коэффициентами A, B . Минимизация данного функционала – поиск стратегии капиталовложений $u_1(\tau)$ такой, что при наименьших затратах будет обеспечена наименьшая смертность;

– если $f_2 = u_2(\tau, t), J(u) = \frac{1}{2} \int_0^{t_{\max}} (N_T(t) - N(T, t))^2 dt$, где u_2 – неординарная миграция в регионе с обыкновенно околонулевой миграцией; J – отклонение фактической численности населения N_T от прогнозируемой N в момент времени T . Тогда посредством решения задачи преследования (1)–(2) методами оптимального управления можно оценить неординарную миграцию функцией u_2 , не являющейся управлением в привычном смысле этого слова.

Перейдём к модели популяционной динамики по Оренбургской области в условиях пандемии:

$$J(u) = \frac{1}{2} \left(\int_0^{t_{\max}} (N_M(\tau', t) - N_{M\tau'}(t))^2 dt + \int_0^{t_{\max}} (N_{ж}(\tau', t) - N_{ж\tau'}(t))^2 dt \right) + \delta \int_0^{t_{\max}} \int_0^{\tau'} (u(\tau, t) - 1)^2 d\tau dt \rightarrow \min; \quad (3)$$

$$\begin{cases} \partial_{\tau} N_M + \partial_t N_M = -u_M(\tau, t) h_M(t) \cdot N_M, \\ \partial_{\tau} N_{ж} + \partial_t N_{ж} = -u_{ж}(\tau, t) h_{ж}(t) \cdot N_{ж}, \\ N_M(0, t) = N_{M0}(t), t \geq 0, \\ N_{ж}(0, t) = N_{ж0}(t), t \geq 0, \\ N_M(\tau, 0) = \gamma_M(\tau) \int_{15}^{50} N_{ж}(\tau, t) dt, \\ N_{ж}(\tau, 0) = \gamma_{ж}(\tau) \int_{15}^{50} N_{ж}(\tau, t) dt, \end{cases} \quad (4)$$

где N_M и $N_{ж}$ – численности мужского и женского населения соответственно; u_M и $u_{ж}$ – влияние факторов среды, не учтённых функциями h_M и $h_{ж}$ – интенсивностями смертности при достаточно стабильных демографических условиях; δ – нормирующий множитель.

Функции $\gamma_M(\tau)$ и $\gamma_{ж}(\tau)$ – модельные коэффициенты рождаемости, удовлетворяющие системе:

$$\begin{cases} \gamma_M(\tau) = \frac{\alpha_1}{50-15} \left(1 - \frac{\delta(\tau)}{1000} \right) \gamma(\tau), \\ \gamma_{ж}(\tau) = \frac{\alpha_2}{50-15} \left(1 - \frac{\delta(\tau)}{1000} \right) \gamma(\tau), \\ \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \end{cases} \quad (5)$$

где α_1, α_2 – доли мальчиков и девочек среди рождённых; $\gamma(\tau)$ – суммарный коэффициент рождаемости; $\delta(\tau)$ – коэффициент младенческой смертности на 1000 человек.

Модельные коэффициенты рождаемости представляет собой среднее количество рождённых детей одной женщиной в зависимости от пола, избежавших смерти в младенческом возрасте, делённое на среднюю продолжительность репродуктивного возраста.

Миграционные слагаемые полагаются равными нулю, так как на основе имеющихся демографических данных [13] можно увидеть, что суммарный миграционный прирост/снижение по Оренбургской области за 2019 и 2020 годы равен соответственно -237 и -624 человек, что пренебрежимо мало по отношению к общей численности Оренбургской области $\sim 1,9$ млн чел.

Из формул (3)–(5) следует, что для нахождения неучтённых факторов среды в период пандемии необходимо знать значения $h(t), N_0(t), \alpha_1, \alpha_2, \gamma(\tau), \delta(\tau)$.

3. Восстановление функциональных параметров модели

Для восстановления интенсивностей смертности предположим, что динамика смертности по Оренбургской области подчиняется классическому закону Гомпертца, тогда

$$h(t) = \alpha e^{\beta t}, \quad (6)$$

где α – начальная интенсивность смертности; β – относительная скорость нарастания интенсивности смертности. Используя методы регрессионного анализа, получили следующие значения параметров (табл. 1).

Таблица 1

Результаты аппроксимации

Table 1

Approximation results

	α	β	R^2
Мужчины	0,000321	0,07514	0,9989
Женщины	0,000074	0,08569	0,9981

Отклонение менее чем на 0,002 от 1 коэффициента детерминации говорит о соответствии динамики смертности по Оренбургской области классическому закону Гомпертца.

Для нахождения начальных распределений $N_0(t)$ используем метод градиентного спуска Adam для некоторого кубического сплайна. Основная идея данного подхода состоит в том, чтобы построить кубический сплайн такой, что его интегралы по возрасту наименьшим образом отклоняются от известных из демографических данных численностей возрастных категорий.

Для нахождения параметров модельных коэффициентов рождаемости используем методы линейной регрессии.

На основе имеющихся данных за 2020 и 2021 годы [13] можно выполнить следующие расчёты:

$$\alpha_1 = \frac{9621}{9621+8992} \approx \frac{10126}{10126+9467} \approx 0,5168.$$

$$\text{Тогда } \alpha_2 = 1 - 0,5168 = 0,4832.$$

Для нахождения $\delta(\tau)$ и $\gamma(\tau)$ решим задачу линейной регрессии на демографических данных по Оренбургской области. Регрессия будет осуществляться таким образом, чтобы $\delta(0)$ и $\gamma(0)$ равнялись своим значениям за 2020 год (табл. 2).

Таблица 2

Результаты линейной регрессии

Table2

Linear regression results

$f = at + b$	a	b	R^2
$\gamma(\tau)$	-0,091	1,52	0,9511
$\delta(\tau)$	-0,85	3,65	0,9897

4. Численное моделирование популяционной динамики в условиях пандемии

Рассмотрим условия теоремы [14] о необходимом условии оптимальности решения задачи (3)–(4) оптимального управления численностью населения в зависимости от возраста.

1. Предполагается, что функции в правой части квазилинейны по N_m, N_j . В обозначениях теоремы имеем, что $f_1 = -u(\tau, t)h(t)$, $f_2 = 0$, $g_1 = \gamma(\tau)$, $g_2 = 0$, $h(\tau, t_0, N) = 0 = h_1N + h_2$, $L_{T_1} = 0$, $L_{T_2} = \frac{1}{2}(N(\tau', t) - N_{\tau'}(t))^2$, $L_1 = 0$, $L_2 = \delta(u(\tau, t) - 1)^2$.

2. f_1 – диагональная матрица, так как в рамках данной задачи f_1 – скаляр.

3. Функции g_2 , h_2 , L_{T_2} , L_2 имеют компактный носитель. Для g_2 и h_2 выполняются тривиально. Компактность носителей L_{T_2} и L_2 следует из рассмотрения задачи на замкнутом и ограниченном временном и возрастном интервалах.

4. Условия на измеримость, непрерывность, дважды дифференцируемость и ограниченность полагаются очевидными.

5. Ограниченность начального условия следует из его восстановления кубическими сплайнами.

6. Для f_2 и $h(\tau, t_0, N)$ неотрицательность – тривиальна. Для $g = g_1N + g_2$ выполняется при неотрицательности $\gamma(\tau)$, что верно при $\tau < 16,7$ для восстановленных модельных коэффициентов рождаемости.

Таким образом, используя алгоритмы численного решения поставленной задачи, можно найти решение, подозрительное на оптимальность.

Для численного решения задачи оптимального управления построим её функцию Лагранжа:

$$\begin{aligned}
 &L(N_M, N_{ж}, u_M, u_{ж}, q_M, q_{ж}) = \\
 &= \frac{1}{2} \left(\int_0^{t_{\max}} (N_M(\tau', t) - N_{M\tau'}(t))^2 dt + \int_0^{t_{\max}} (N_{ж}(\tau', t) - N_{ж\tau'}(t))^2 dt \right) + \\
 &+ \delta \int_0^{t_{\max}} \int_0^{\tau'} (u(\tau, t) - 1)^2 d\tau dt - \int_0^{\tau'} \int_0^{t_{\max}} q_M(\tau, t) (N_{M\tau} + N_{Mt} + u_M h_M N_M) dt d\tau - \\
 &- \int_0^{\tau'} \int_0^{t_{\max}} q_{ж}(\tau, t) (N_{ж\tau} + N_{жt} + u_{ж} h_{ж} N_{ж}) dt d\tau.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Составим соответствующие сопряжённые уравнения:

$$\begin{cases}
 q_{M\tau} + q_{Mt} = u_M h_M q_M, \\
 q_{ж\tau} + q_{жt} = u_{ж} h_{ж} q_{ж}, \\
 q_M(\tau', t) = N_M(\tau', t) - N_{M\tau'}(t), \\
 q_{ж}(\tau', t) = N_{ж}(\tau', t) - N_{ж\tau'}(t), \\
 q_M(\tau, t_{\max}) = 0, \\
 q_{ж}(\tau, t_{\max}) = 0.
 \end{cases} \tag{8}$$

Найдём управления из условия равенства производной функции Лагранжа по управлению нулю:

$$\begin{aligned}
 u_M(\tau, t) &= 1 + \frac{h_M(\tau) q_M(\tau, t) N_M(\tau, t)}{\delta}, \\
 u_{ж}(\tau, t) &= 1 + \frac{h_{ж}(\tau) q_{ж}(\tau, t) N_{ж}(\tau, t)}{\delta}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Тогда опишем дискретную постановку задачи (3)–(4) для описания численного алгоритма нахождения решения:

$$\begin{aligned}
 J(u) &= \frac{1}{2} \left(\sum_{j=0}^{t_{\max}/\Delta t} (N_{M\tau'/\Delta\tau, j} - N_{M\tau' j}^{\tau'})^2 \Delta t + \sum_{j=0}^{t_{\max}/\Delta t} (N_{ж\tau'/\Delta\tau, j} - N_{ж\tau' j}^{\tau'})^2 \Delta t \right) + \\
 &+ \delta \sum_{i=0}^{\tau'/\Delta\tau} \sum_{j=0}^{t_{\max}/\Delta t} (u_{i, j} - 1)^2 \Delta t \Delta \tau \rightarrow \min;
 \end{aligned} \tag{3'}$$

$$\begin{cases}
 \frac{N_{Mi+1, j} - N_{Mi, j}}{\Delta\tau} + \frac{N_{Mi, j+1} - N_{Mi, j}}{\Delta t} = -u_{Mi, j} h_{Mj} \cdot N_{Mi, j}, \\
 \frac{N_{жi+1, j} - N_{жi, j}}{\Delta\tau} + \frac{N_{жi, j+1} - N_{жi, j}}{\Delta t} = -u_{жi, j} h_{жj} \cdot N_{жi, j}, \\
 N_{M0, j} = N_{Mj}^0, \quad t \geq 0, \\
 N_{ж0, j} = N_{жj}^0, \quad t \geq 0, \\
 N_{Mi, 0} = \gamma_{Mi} \sum_{j=15/\Delta t}^{50/\Delta t} N_{жi, j} \Delta t, \\
 N_{жi, 0} = \gamma_{жi} \sum_{j=15/\Delta t}^{50/\Delta t} N_{жi, j} \Delta t,
 \end{cases} \tag{4'}$$

где Δt и $\Delta \tau$ – шаги в равномерных сетках по времени и по возрасту соответственно.

Тогда алгоритм численного решения нелинейной гиперболической задачи оптимального управления с ДУ в ЧП имеет вид [15]:

1. Задаём значения $u_{Mi, j}^0$ и $u_{жi, j}^0$ для любой пары (i, j) .
2. Из системы (4') вычисляем соответственные траектории N_M^0 и $N_{ж}^0$.
3. Вычисляем значение функционала J^0 .
4. Если $J^0 \leq \varepsilon_j$ или $|J^m - j^{m-1}| \leq \varepsilon_{\Delta j}$, то решение получено, иначе
5. Находим сопряженные множители q^0 , аналогично N^0 .
6. Вычисляем новое управление u^1 путём минимизации функции Лагранжа.
7. Переходим к шагу 2.

Отметим, что величины ε_j и $\varepsilon_{\Delta j}$ – допустимая точность приближения и допустимая точность сходимости соответственно.

Используя данный алгоритм, построили распределение численности на 1 января 2021 года, характеризуемое следующими отклонениями от фактических численностей возрастных категорий (табл. 3).

Таблица 3

Оценка точности моделируемого распределения на 1 января 2021 года

Table 3

Estimation of the accuracy of the simulated distribution as of January 1, 2021

t_{oi}	Отклонение от n_i , %		t_{oi}	Отклонение от n_i , %	
	Мужчины	Женщины		Мужчины	Женщины
0	-0,64	-0,58	25	1,42	1,70
1	0,04	0,79	30	-1,46	-1,60
2	-0,02	0,05	35	2,74	2,65
3	-1,09	-1,06	40	-3,15	-2,36
6	3,91	1,31	45	3,17	2,79
7	0,60	0,72	50	-3,16	-2,44
8	0,12	-0,46	55	1,45	1,63
14	-1,43	2,80	60	-0,52	-0,70
16	0,88	-0,53	65	-0,68	-1,73
18	0,64	3,49	70	-1,80	1,74
20	-1,01	-1,96			

5. Количественная оценка влияния пандемии

В соответствии с законом Гомпертца и выражения $u(\tau, t)h(t) = \alpha u(\tau, t)e^{\beta t} = \alpha e^{\beta t + \ln(u(\tau, t))}$ получим, что $\ln(u(\tau, t))$ – зависящая от времени нелинейная компонента относительной скорости нарастания интенсивности смертности. Обозначим также величину $\beta t + \ln(u(\tau, t))$ как темп нарастания интенсивности смертности. Построим графики для рассматриваемых величин (рис. 1).

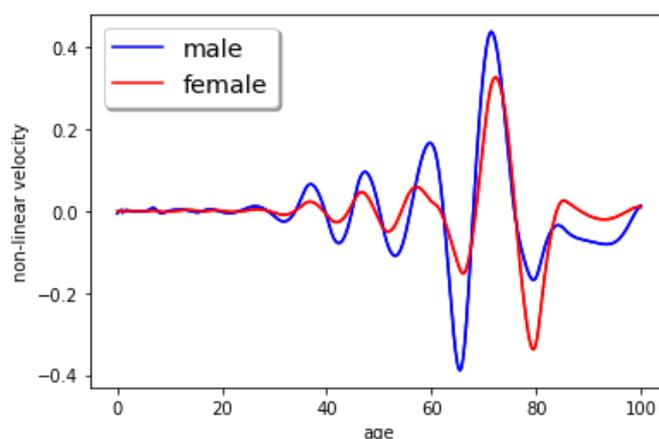


Рис. 1. Графики $\ln(u_m(1, t))$ и $\ln(u_j(1, t))$
Fig. 1. Graph of $\ln(u_m(1, t))$, $\ln(u_j(1, t))$

Из анализа темпа нарастания интенсивности смертности можно отметить, что неординарные внешние факторы играют заметную роль для возрастных категорий 60–80 у мужчин и 62–85 у женщин. Кроме того, влияние внешних факторов на динамику смертности у мужчин сильнее и затрагивает больший возрастной диапазон.

Для оценки доли влияния пандемии COVID-19 на динамику смертности по Оренбургской области рассмотрим функции:

$$\delta_m(\tau, t) = \ln(u_m(\tau, t)) - \ln(u_{m2019}(\tau - 1, t))$$

и

$$\delta_j(\tau, t) = \ln(u_j(\tau, t)) - \ln(u_{j2019}(\tau - 1, t)),$$

где u_{m2019} и u_{j2019} – функции, полученные аналогично u_m и u_j на основе данных за 2019 год (до пандемии).

Построим графики функции $\delta_m(1, t)$ и $\delta_j(1, t)$ (рис. 2).

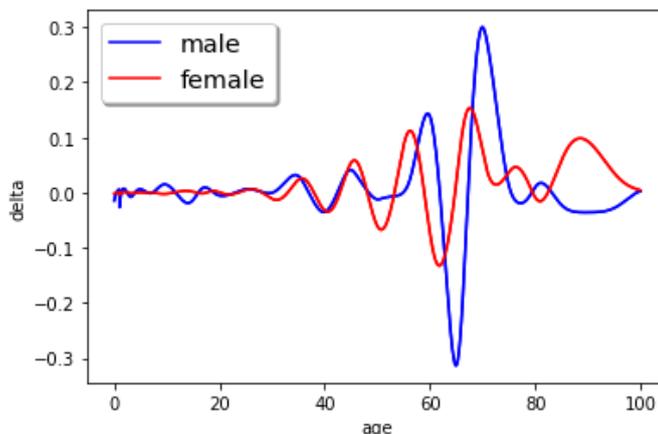


Рис. 2. Графики $\delta_m(1, t)$ и $\delta_{ж}(1, t)$
Fig. 2. Graph of $\delta_m(1, t)$, $\delta_{ж}(1, t)$

Величины $\delta_m(\tau, t)$ и $\delta_{ж}(\tau, t)$ представляют собой очищенное от влияния внешних сезонных и возрастных факторов, полагаемых ординарными (действовавшими в доковидный год), влияние не учтённых моделью факторов.

Тем самым величины $\delta_m(\tau, t)$ и $\delta_{ж}(\tau, t)$ можно интерпретировать как влияние пандемии в целом, т. е. влияние как самого вируса, так и ответных действий на него. Из построенного выше графика следует, что наибольшее влияние пандемия оказала на 55–80-летних среди мужчин и 55–70-летних среди женщин. Из амплитуд (для мужчин максимальная амплитуда – порядка 0,3, для женщин – 0,15) полученных кривых можно сделать вывод, что пандемия оказала большее влияние на мужчин, чем на женщин, однако волнообразный характер полученных кривых может свидетельствовать также о зашумлённости восстановленного начального распределения численности населения.

Тогда для проверки адекватности модели рассмотрим величину, независимую от точного вида распределения численности.

По определению средняя ожидаемая продолжительность жизни (СОПЖ) – математическое ожидание случайной величины «Вероятность умереть в возрасте t ».

Распределение данной случайной величины в рамках управляемой модели имеет вид

$$F_\tau(t_i) = \frac{1}{\sum_s m_s} \sum_{k=1}^i m_k, \quad (10)$$

где $m_k = N(\tau, t_{k+1}) - N(\tau - \Delta\tau, t_k)$ – количество умерших за время $\Delta\tau$ людей возраста t_k .

Тогда СОПЖ μ_τ вычисляется по формуле

$$\mu_\tau = \int_0^{t_{\max}} t dF_\tau = \sum_i t_i \frac{F_\tau(t_{i+1}) - F_\tau(t_i)}{\Delta t} \Delta t. \quad (11)$$

Построим графики μ_{m_τ} и $\mu_{ж_\tau}$ при $\tau \in [0; 1]$ – СОПЖ для мужчин и женщин соответственно в течение 2020 года (рис. 3, 4).

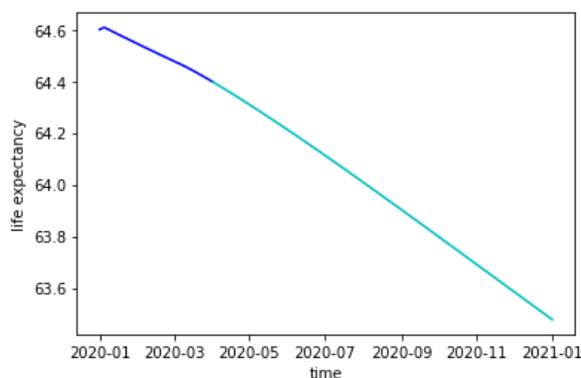


Рис. 3. График СОПЖ μ_{m_τ}
Fig. 3. Graph of ALE μ_{m_τ}

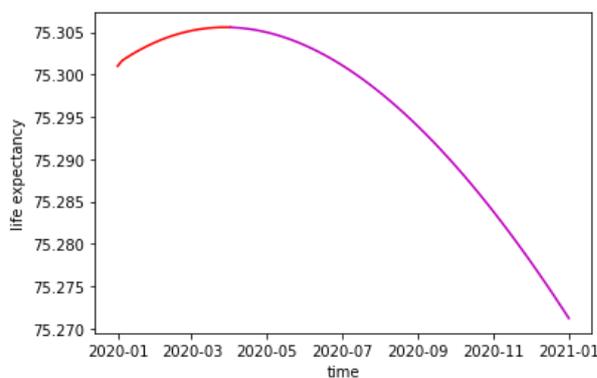


Рис. 4. График СОПЖ $\mu_{ж_\tau}$
Fig. 4. Graph of ALE $\mu_{ж_\tau}$

На основе рис. 3, 4 можно заключить, что, во-первых, средняя продолжительность жизни среди мужчин падает быстрее, чем у женщин. Во-вторых, начиная с $\tau \approx 0,2-0,25$, у мужчин увеличивается скорость, а у женщин начинается падение средней ожидаемой продолжительности жизни.

Данный временной промежуток соответствует периоду, начинающемуся в конце февраля и заканчивающемуся в конце марта, – появлению COVID-19 в Оренбургской области.

Полученный результат свидетельствует об адекватности построенной модели оптимального управления как для описания динамики населения, так и для количественной оценки влияния пандемии на демографическую динамику. При этом пандемия COVID-19 довольно сильно повлияла на демографическую структуру населения Оренбургской области.

Заключение

Таким образом, в рамках данной работы разработана модель динамики численности населения в условиях пандемии. Преимуществами данной модели является, во-первых, высокое качество прогнозов при моделировании краткосрочной динамики, во-вторых, для инициализации функциональных параметров модели необходимы только базовые, общедоступные демографические данные, что облегчает её применение.

Результаты проведенных экспериментов показали, что построенная модель обеспечивает глобальное качество прогноза порядка 1,5 %, а суммарное абсолютное отклонение равно 32 457 чел. при населении Оренбургской области 1 942 915 чел. Оценка построенной модели интегральной характеристикой, не зависимой от точного вида распределения численности, средней ожидаемой продолжительностью жизни свидетельствует об адекватности построенной модели демографической действительности, а также о значимом негативном влиянии пандемии на продолжительность жизни обоих полов.

Список литературы/References

1. Drummond P. Assessing City governance for low-carbon mobility in London. *Sustainability*. 2021;13(5):2480. DOI: 10.3390/su13052480
2. Faure J.C., Faust K.M. Socioeconomic characteristics versus density changes: The operational effects of population dynamics on water systems. In: *Sustainable and Resilient Infrastructure*; 2020. P. 1–14. DOI: 10.1080/23789689.2020.1757882
3. Jones C.A., Kandel W., Parker T. Population dynamics are changing the profile of rural areas. *Journal of Rural Mental Health*. 2007;31(3):46–53. DOI: 10.1037/h0095944
4. Selvarajah S. Effective human wastewater management in rapidly growing towns in sensitive receiving environment-A perspective on Queenstown-Lakes District Area. Available at: https://www.researchgate.net/publication/274700834_Effective_human_wastewater_management_in_rapidly_growing_towns_in_sensitive_receiving_environment_-_A_perspective_on_Queenstown-Lakes_District_Area_New_Zealand_A_KEYNOTE_Presentation (accessed 13.07.2022).
5. Busilac A.J. The Relationship between Population Dynamics and Investments for Energy and Telecommunication Infrastructures in the Philippines. Available at: <https://mpira.ub.uni-muenchen.de/51845/> (accessed 13.07.2022).
6. Faust K.M., Kaminsky J.A. Population dynamics and the resiliency of water and wastewater infrastructure. In: *Routledge Handbook of Sustainable and Resilient Infrastructure*; 2018. P. 341–358.
7. Hummel D., Lux A. Population decline and infrastructure: The case of the German water supply system. In: *Vienna yearbook of population research*; 2007. P. 167–191. DOI: 10.1553/populationyearbook2007s167
8. Liu Y., Westelius N. The impact of demographics on productivity and inflation in Japan. *Journal of International Commerce, Economics and Policy*. 2017;8(02):1750008. DOI: 10.5089/9781475559712.001
9. Madubueze C.E., Dachollom S., Onwubuya I.O. Controlling the spread of COVID-19: optimal control analysis]. In: *Computational and Mathematical methods in Medicine*. 2020. P. 6862516–6862516. DOI: 10.1155/2020/6862516
10. Lü, X. et al. Stability and optimal control strategies for a novel epidemic model of COVID-19. *Nonlinear Dynamics*. 2021;106(2):1491–1507. DOI: 10.1007/s11071-021-06524-x
11. Gurtin M.E., MacCamy R.C. Non-linear age-dependent population dynamics]. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*. 1974;54(3):281–300. DOI: 10.1007/BF00250793

12. Murphy L.F. A nonlinear growth mechanism in size structured population dynamics]. *Journal of theoretical biology*. 1983;104(4):493–506. DOI: 10.1016/0022-5193(83)90242-4
13. Григорьева Л.К., Кузьмин С.А. Медико-демографические показатели Оренбургской области // Справочник врача общей практики. 2021. № 2. С. 65–71. Grigorieva L.K., Kuzmin S.A. Medical and demographic indicators of the Orenburg region. *Reference book of a general practitioner*. 2021;(2):65–71. (in Russ.)]. DOI: 10.33920/med-10-2102-07
14. Brokate M. Pontryagin's principle for control problems in age-dependent population dynamics. *Journal of Mathematical Biology*. 1985;23(1):75–101. DOI: 10.1007/BF00276559
15. Herty M., Kurganov A., Kurochkin D. Numerical method for optimal control problems governed by nonlinear hyperbolic systems of PDEs. *Communications in Mathematical Sciences*. 2015;13(1):15–48.

Информация об авторах

Болодурина Ирина Павловна, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой прикладной математики, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия; prmat@mail.osu.ru.

Борщук Евгений Леонидович, д-р мед. наук, проф., заведующий кафедрой общественного здоровья и здравоохранения, Оренбургский государственный медицинский университет, Оренбург, Россия; be@orgma.ru.

Воробьев Иван Григорьевич, студент кафедры прикладной математики, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия; ivanexplay2000@gmail.com.

Гришина Любовь Сергеевна, аспирант кафедры прикладной математики, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия; grishina_ls@inbox.ru.

Information about the authors

Irina P. Bolodurina, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg, Russia; prmat@mail.osu.ru.

Evgeny L. Borshchuk, Dr. Sci. (Med.), Prof., Head of the Department of Public Health and Healthcare, Orenburg State Medical University, Orenburg, Russia; be@orgma.ru.

Ivan G. Vorobyov, Student of the Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg, Russia; ivanexplay2000@gmail.com.

Lubov S. Grishina, Postgraduate Student of the Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg, Russia; grishina_ls@inbox.ru.

Статья поступила в редакцию 27.06.2022

The article was submitted 27.06.2022

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЛЯЦИОННЫХ БАЗ ДАННЫХ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ КОНТРОЛИРУЕМОГО РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГА

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

А.А. Максимов²

В.В. Захаров¹, metkol@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3321-7156>

М.В. Щемлев^{1, 3}, 33333rudder@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5949-5843>

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Государственная Дума Федерального Собрания Российской Федерации VIII созыва, Москва, Россия

³ ООО «КАМСС», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Машиностроение – главная отрасль промышленности, уровень её развития определяет научно-технические возможности и потенциал страны, определяет качество человеческого капитала, а также она является основой для поддержания обороноспособности государства. Как правило, для успешного функционирования в данной отрасли широко используются возможности кооперации с контрагентами как на внутреннем, так и на внешнем рынке. В настоящее время Россия имеет зависимость от продукции иностранного машиностроения, она наблюдается во всех областях данной сферы – общем, тяжелом, среднем, легком, точном и энергетическом машиностроении. По причине усиления санкционного давления недружественных государств возможности импорта необходимых изделий и комплектующих неуклонно снижаются. Особенную тревогу вызывает ситуация зависимости от импорта системообразующих и оборонных предприятий, а также предприятий, обеспечивающих государственную деятельность. В связи с этим требуется ускорение реализации политики импортозамещения с применением реверсивного инжиниринга. Данный метод показал свою состоятельность, так как был использован ведущими промышленными державами. **Цель исследования:** обосновать важность реверсивного инжиниринга как инструмента реализации политики импортозамещения, показать возможности его контроля и ускорения процедуры его проведения с использованием реляционной математической модели. Реляционная математическая модель построена на основе правил реляционной алгебры. **Методы.** Выявлена хронология возникновения зависимости России от импортных комплектующих, на примере опыта Китая обоснована важность реверсивного инжиниринга. **Результаты.** Зависимость России от импорта берет свое начало еще со времен Советского Союза. Предложена реляционная модель данных для ускорения, организации и контроля за реверсивным инжинирингом в России. **Заключение.** Полученные результаты исследования могут иметь практическое применение в реализации политики импортозамещения, проводимой в Российской Федерации. Требования по ускорению реализации вышеуказанной политики обоснованы сужающимся кругом возможностей импортирования ключевых компонентов и изделий и нарастанием внешнеполитической и внешнеэкономической напряженности.

Ключевые слова: реверсивный, инжиниринг, санкции, реляционный, базы данных, технологические операции, технологическое оборудование

Для цитирования: Использование реляционных баз данных для организации контролируемого реверс-инжиниринга / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.В. Захаров, М.В. Щемлев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 151–158. DOI: 10.14529/ctcr220415

USING RELATIONAL DATABASES FOR ORGANIZATIONS OF CONTROLLED REVERSE ENGINEERING

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

A.A. Maksimov²

V.V. Zakharov¹, metkol@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3321-7156>

M.V. Shchemlev^{1,3}, 33333rudder@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5949-5843>

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation of the VIII convocation, Moscow, Russia

³ LLC "KAMSS", Saint Petersburg, Russia

Abstract. Mechanical engineering is the main branch of industry, the level of its development determines the scientific and technical capabilities and potential of the country, determines the quality of human capital, and it is also the basis for maintaining the defense capability of the state. As a rule, for successful functioning, in this industry, opportunities for cooperation with counterparties are widely used both in the domestic and foreign markets. Currently, Russia is dependent on the products of foreign engineering, it is observed in all areas of this sphere – general, heavy, medium, light, precision and power engineering. Due to the increased sanctions pressure of unfriendly states, the possibilities of importing the necessary products and components are steadily decreasing. Of particular concern is the situation of dependence on imports of backbone and defense enterprises, as well as enterprises providing state activities. In this regard, it is necessary to accelerate the implementation of the import substitution policy with the use of reverse engineering. This method has shown its viability, because it was used by leading industrial powers. **The purpose of the study** is to substantiate the importance of reverse engineering as a tool for implementing the import substitution policy, to show the possibilities of its control and acceleration of the procedure for its implementation using a relational mathematical model. The relational mathematical model is based on the rules of relational algebra. **Methods.** The chronology of the emergence of Russia's dependence on imported components is revealed, the importance of reverse engineering is justified by the example of China's experience. **Results.** Russia's dependence on imports dates back to the Soviet Union. A relational data model for acceleration, organization and control of reverse engineering in Russia is proposed. **Conclusion.** The obtained research results may have practical application in the implementation of the import substitution policy carried out in the Russian Federation. The requirements for accelerating the implementation of the above-mentioned policy are justified by the narrowing range of opportunities for importing key components and products and the increase in foreign policy and foreign economic tensions.

Keywords: reversible, engineering, sanctions, relational, database, technological operations, technological equipment

For citation: Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Zakharov V.V., Shchemlev M.V. Using relational databases for organizations of controlled reverse engineering. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(4):151–158. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220415

Введение

Актуальность проблемы импортозамещения обоснована возросшим санкционным давлением со стороны недружественных государств и подтверждена недавними исследованиями ряда авторов [1–5]. Необходимость ускорения решения данной проблемы объясняется требованиями безопасности и функционирования базовых отраслей государства. Из-за попадания России в зависимость от импорта из стран Запада и дальнейшего введения санкций в отношении поставок высокотехнологичной продукции в Россию остро встал вопрос о проведении политики импортозамещения. Одним из инструментов реализации данной политики видится реверсивный или обратный инжиниринг. Данный метод не является чем-то новым для промышленности нашей страны и ак-

тивно применялся в годы Великой Отечественной войны как способ изучения и производства на собственных мощностях иностранных изделий. Так, например, самолет Ту-4 является аналогом В-29, а тепловоз ТЭ1 – аналогом RSD-1. Появление контрольно-измерительных машин различных типов и использование методов металлографии вывели реверсивный инжиниринг на новый уровень.

В исследовании выявлена хронология кризисных явлений в науке и технике в Советском союзе и показана причинно-следственная связь между данными событиями и импортозависимостью России в настоящее время, а также построена реляционная модель данных для организации и контроля за процессом реверсивного инжиниринга. Полученная база данных обеспечит быстрый доступ к информации по выполняемым видам технологических операций и парку технологического оборудования машиностроительных предприятий России.

1. Анализ причин импортозависимости

Основную опасность для функционирования отрасли машиностроения представляет технологическая зависимость. Так, в 2006 г. уровень зависимости составлял 8,5 %, в 2016 г. – 12 %. В то же время исследователями отмечается, что импортозависимость способна оказывать сдерживающий эффект для развития экономики, а импортозамещение является одним из драйверов роста экономики [6]. В данном исследовании под импортозависимостью следует понимать именно технологическую зависимость, когда отсутствие возможности изготовления каких-либо изделий, узлов или компонентов на внутреннем рынке России в совокупности с санкциями влечет невозможность изготовления конечного продукта либо выполнения технологических операций.

Перед анализом причин утраты нашей страной компетенций в сфере машиностроения хотелось бы остановиться на аналогичных мощностях Советского союза. Предлагается не оценивать предприятия и отрасли уже бывшего Советского союза с точки зрения их экономической эффективности, а остановиться на их научно-техническом потенциале. Так, согласно данным, приведенным в работе [7], динамика научных открытий СССР представлена в табл. 1, распределение открытий по объектам и отраслям науки за аналогичный период и техники – в табл. 2.

Таблица 1
Структура научных открытий СССР, сделанных в период
с 1931 по 1990 г.

Table 1
The structure of scientific discoveries in the USSR, made in the period
from 1931 to 1990

Период	Объект открытия			Всего открытий
	Закономерность	Свойство	Явление	
1931–1935	–	–	1	1
1936–1940	1	1	2	4
1941–1945	1	–	3	4
1946–1950	7	7	11	25
1951–1955	5	6	21	32
1956–1960	15	11	48	74
1961–1965	7	10	73	90
1966–1970	16	12	61	89
1971–1975	11	6	30	47
1976–1980	2	8	10	20
1981–1985	–	–	6	6
1986–1990	–	–	–	–

Распределение открытий по объектам и отраслям науки и техники,
сделанных в период с 1931 по 1990 г.

Table 2

Distribution of discoveries by objects and branches of science and technology
made in the period from 1931 to 1990

Отрасли науки и техники	Объект открытия			Всего
	Закономерность	Свойство	Явление	
Медицина	–	14	30	44
Биология	12	18	21	51
Химико-технологические науки	12	11	48	71
Ядерная физика	17	2	54	73
Физика твердого тела. Оптика	6	6	59	71
Механика и автоматика	4	1	15	20
Науки о Земле	11	4	19	34
Исследование космоса	3	5	20	28

Из табл. 1, 2 видно, что количество научных открытий росло в период с 1936 г. по 1965 г., затем наблюдалось постоянное снижение до полного отсутствия открытий в период с 1986 по 1990 г., а основные открытия были технической направленности.

Вышеуказанное позволяет выдвинуть два имеющих важность для нашего исследования тезиса:

– все открытия сделаны в фундаментальных и наукоемких отраслях, влияющих в том числе и на отрасль машиностроения;

– кризисные явления в науке и технике, которые являются одной из причин технологического отставания и зависимости от импорта современной России, начались около 50 лет назад.

Прекращение существования Советского союза в 1991 году сопровождалось сменой экономической и политической моделей устройства страны. Эти явления ознаменовались чередой экономических реформ, усугубивших и так ухудшающееся положение в научно-технической сфере. Данные реформы, основанные на рекомендациях Международного валютного фонда, были проведены без учета особенностей технологических и экономических взаимосвязей между предприятиями бывшей РСФСР и другими странами Союза. Это повлекло невозможность изготавливать обширную номенклатуру изделий, а многие предприятия были утрачены ввиду их банкротства из-за экономической неэффективности на мировом рынке. Зачастую данные предприятия имели уникальные технологии. Этот факт отмечается у довольно обширного ряда ученых и исследователей, например, об этом говорится в работах [8–11].

2. Реверсивный инжиниринг как один из основных инструментов политики импортозамещения

Рассматривая данный метод с точки зрения его использования в политике импортозамещения, предлагаем обратиться к опыту Китая, где реверсивный инжиниринг впервые приобрел массовый характер на государственном уровне. Так, например, правительство Шеньчжэня впервые выдвинуло идею о легализации копирования иностранных изделий. При копировании в изделие добавляется некоторая добавленная стоимость за счет внедрения модификаций. Особенно распространен реверсивный инжиниринг в Китае для производства военной техники [12]. Для подтверждения успешности данного метода достаточно взглянуть на автомобили китайского производства, например, такие как Chery QQ или Shuanghuan SCEO, в военной промышленности следует обратить внимание на БМП ZBD04, истребители J-1 и J-6.

С введением санкций и ограничением поставок изделий и комплектующих использование реверсивного инжиниринга видится необходимым условием для реализации политики импортозамещения. Реверсивный инжиниринг любого изделия машиностроения включает в себя следующие этапы анализа изделия:

- 1) характеристики материала и заготовки;
- 2) геометрические параметры деталей и их сборочных соединений;

- 3) наличие покрытий;
- 4) требования к термической обработке;
- 5) требования к контрольным испытаниям готовых изделий.

Полный цикл реверсивного инжиниринга и дальнейшее изготовление зачастую невозможно выполнить на мощностях одного предприятия, так как каждый вышеуказанный этап для своего выполнения требует специализированного оборудования. Так, например, для анализа геометрических параметров потребуются различные контрольно-измерительные машины, поставка которых на российский рынок также затруднена, для проведения испытаний – стенды и нестандартное оборудование, для нанесения покрытия – мощности гальванического цеха. Таким образом, для успешного импортозамещения изделий и комплектующих предприятию машиностроения в большинстве случаев потребуется значительно увеличить парк технологического оборудования.

Выход в решении данной проблемы видится в создании с помощью государственных органов контрольной базы данных с информацией об имеющемся оборудовании на российских предприятиях, работающих в отрасли машиностроения, и его технологических возможностях. Такая база данных облегчит кооперацию предприятий российской промышленности для выполнения реверсивного инжиниринга, позволит государству взять данный инструмент под контроль путем отслеживания исполнения и характера договоров, возникших в результате кооперации.

3. Реляционная модель данных

Реляционная модель данных, предложенная еще в 1970 году Е.Ф. Коддом, представляет собой набор двумерных таблиц, взаимосвязи между которыми подчиняются теории множеств. На основе данных таблиц возможно создание реляционной базы данных.

К базам данных такого типа применимы стандартные операции сокращения, выборки, проекции, соединения, объединения и умножения, описанные в работах Е.Ф. Кодда [13] и К.Дж. Дейта [14], а также поддержка функции каталога.

Математическая модель реляционной базы данных подчиняется законам реляционной алгебры, с помощью которой реляционную операцию можно представить в соответствии с формулой

$$Y = f(Y_1, Y_2, \dots, Y_n), \quad (1)$$

где Y – возвращаемое отношение; n – количество отношений.

Для организации, ускорения и контроля за процессом реверсивного инжиниринга видится необходимость создания базы данных технологических возможностей предприятий России.

Пример представления информации базы данных показан в табл. 3 и 4.

Данные об обладании предприятиями технологическими мощностями

Таблица 3

Table 3

Data on the ownership of technological enterprises capacities

ID	Наименование предприятия, контакты	Тип оборудования	Выполняемая операция	Максимальный габарит детали, мм	Максимальная масса детали, кг	Модель оборудования
1	ООО «КАМСС», https://kamss.ru/	Контрольно-измерительная машина	Измерения	1200×1800×800	1200	Contura 12/18/8
2	ООО «РТ-ДТЗ», https://rtdtz.ru/	Тестер герметичности	Испытания	Не ограничено	Не ограничено	Forrest T8090
3	АО «НПК «Уралвагон-завод», http://www.ubtuvz.ru/	Электропечь сопротивления шахтная	Закалка, цементация, нитроцементация	∅600×600	200	СПЦМ 6.6/9,5И9
4	ООО «ЧТЗ-Уралтрак», http://chtz-uraltrac.ru/	Измерительная рука	Измерения	1200×1200×1200	Не ограничено	Hexagon Absolute Arm Compact

Таблица 4

Данные о технических характеристиках оборудования

Table 4

Equipment Specification Data

Модель оборудования	Тип оборудования	Год выпуска	Технические характеристики
Contura 12/18/8	Контрольно-измерительная машина	2021	Ссылка на информацию с техн. характеристиками
Fortest T8090	Тестер герметичности	2021	Ссылка на информацию с техн. характеристиками
СШЦМ 6.6/9,5И9	Электродпечь сопротивления шахтная	2019	Ссылка на информацию с техн. характеристиками
Hexagon Absolute Arm Compact	Измерительная рука	2019	Ссылка на информацию с техн. характеристиками

В соответствии с реляционной алгеброй строки таблиц являются кортежами r , столбцы – доменами D , сама таблица – отношением Y . В табл. 3 каждый кортеж состоит из 6 элементов, в табл. 4 – из 4.

В качестве примера работы с реляционной базой данных опишем математически операцию выборки.

Из отношения Y в соответствии с некоторым условием γ для множества атрибутов X будет произведено новое отношение в соответствии с формулой

$$Y[\gamma(X)] = \{r \mid r \in Y \wedge \gamma[X]\}. \quad (2)$$

Таким образом, результат операции выборки в соответствии с условием

$$\gamma(r[X]) = (\text{Максимальный габарит детали, мм} = 1200 \times 1200 \times 1200)$$

показан в табл. 5 [15]. Первичными ключами в данном случае являются ID, которые присваиваются каждому предприятию в момент регистрации в системе и являются уникальными.

Таблица 5

Результат операции «Выборка»

Table 5

The result of the “Select” operation

ID	Наименование предприятия, контакты	Тип оборудования	Выполняемая операция	Максимальный габарит детали, мм	Максимальная масса детали, кг	Модель оборудования
3	АО «НПК «Уралвагонзавод», http://www.ubtuvz.ru/	Электродпечь сопротивления шахтная	Закалка, цементация, нитроцементация	Ø600 × 600	200	СШЦМ 6.6/9,5И9

Заключение

С помощью анализа данных по количеству научных открытий установлена одна из причин утраты Россией компетенций и возникшего отставания от мирового уровня в отрасли машиностроения, приведена хронология формирования данного отставания.

На примере изучения опыта Китая сделан вывод о положительном влиянии реверсивного инжиниринга на реализацию политики импортозамещения и сокращения зависимости от иностранных комплектующих.

Реляционные базы данных, основанные на реляционной алгебре, предлагаемые к использованию, обеспечат отслеживание потребности российской промышленности в импортных комплектующих в реальном времени, а также позволят взять процесс реверсивного инжиниринга под государственный контроль. Степень подробности и характер информации в таких базах данных может быть пересмотрен в любое время в зависимости от потребностей контрагентов и государства.

Список литературы

1. Алехина Т.А., Захаркина Н.В. Импортозамещение как основной инструмент развития экономики России // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. № 45 (1). С. 223–235. DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-1-223-235
2. Жакевич А.Г. Импортозамещение: проблемы и перспективы // Вестник Международного института экономика и права. 2015. № 1 (18). С. 36–39.
3. Алексеев Н.Е. Импортозамещение как институт укрепления национального суверенитета // Мировая политика. 2019. № 2. С. 43–50. DOI: 10.25136/2409-8671.2019.2.18639
4. Елецкий Н.Д., Столбовская А.Г. Импортозамещение в России: не проблема, а задача // Молодой ученый. 2015. № 6 (86). С. 406–408.
5. Коваленко С., Сарварова Р., Чибугаева С. Импортозамещение как фактор роста экономики страны // Молодой ученый. 2015. № 24 (104). С. 466–468.
6. Березинская О., Ведев А. Зависимость российской экономики от импорта // Экономическое развитие России. 2017. Т. 24, № 4. С. 19–25.
7. Павлов А.М. Динамика открытий и изобретений (1931–1990) // Вестник Российской Академии Наук. 1996. Т. 66, № 5. С. 415–421.
8. 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.
9. Корицкий Э.Б. Научный менеджмент: российская история. СПб: Питер, 1999. 384 с.
10. Коптев В.И. Сравнительный анализ приватизации в России и зарубежных странах // Вестник Челябинского государственного университета. 2010. № 28 (209). С. 82–85.
11. Сухова О.А. История приватизации в России: некоторые результаты научной рефлексии // Известия Пензенского Государственного педагогического университета имени В.Г. Белинского. 2012. № 27. С. 1019–1023.
12. Син В., Ковалев М. Китай строит экономику знаний // Вестник Ассоциации белорусских банков. 2015. № 7 (758). С. 3–11.
13. Codd E.F. A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks // Communications of the ACM. 1970. No. 6. P. 377–387.
14. Дейт К.Дж. Введение в системы баз данных: пер. с англ. 8-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1328 с.
15. Фуфаев Э.В., Фуфаев Д.Э. Базы данных. М.: Академия, 2016. 320 с.

References

1. Alyokhina T.A., Zakharkina N.V. Import substitution as a basic development tool of the Russian economy. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2018;45(1):223–235. (In Russ.) DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-1-223-235
2. Zhakevich A.G. Import substitution: problems and prospects. *Herald of International Institute of Economics and Law*. 2015;1(18):36–39. (In Russ.)
3. Alekseev N.E. Import substitution as an institution of strengthening the national sovereignty strengthening. *Mirovaya politika*. 2019;(2):43–50. (In Russ.) DOI: 10.25136/2409-8671.2019.2.18639
4. Eletskiy N.D., Stolbovskaya A.G. [Import substitution in Russia: not a problem, but a task]. *Young Scientist*. 2015;6(86):406–408. (In Russ.)
5. Kovalenko S., Sarvarova R., Chibugaeva S. [Import substitution as a factor in the growth of the country's economy]. *Young Scientist*. 2015;24(104):466–468. (In Russ.)
6. Berezinskaya O., Vedev A. Russian economy's dependence on imports. *Russian Economic Development*. 2019;24(4):19–25. (In Russ.)
7. Pavlov A.M. [Dynamics of discoveries and inventions (1931–1990)]. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 1996;66(5):415–421. (In Russ.)
8. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N., Burkova I.V., Gel'rud Ya.D., Korennaya K.A., Shestakov A.L. *Upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy: monografiya* [Management of industrial enterprises: strategies, mechanisms, systems: monograph]. Moscow: INFRA-M Publ.; 2018. 410 p. (In Russ.)
9. Koritskiy E.B. *Nauchnyy menedzhment: rossiyskaya istoriya* [Scientific management: Russian history]. St. Petersburg: Piter Publ.; 1999. 384 p. (In Russ.)

10. Koptev V.I. [Comparative analysis of privatization in Russia and foreign countries]. *Bulletin of Chelyabinsk State University*. 2010;28(209):82–85. (In Russ.)
11. Sukhova O.A. [The history of privatization in Russia: some results of scientific reflection]. *Proceedings of the Penza State Pedagogical University named after V.G. Belinsky*. 2012;(27):1019–1023. (In Russ.)
12. Sin V., Kovalev M. [China is building a knowledge economy]. *Vestnik Assotsiatsii belorusskikh bankov*. 2015;7(758):3–11. (In Russ.)
13. Codd E.F. A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks. *Communications of the ACM*. 1970;(6):377–387.
14. Date C.J. *An Introduction to Database Systems*. 8th ed. Pearson: Addison Wesley; 2004.
15. Fufayev E.V., Fufayev D.E. *Bazy dannykh [Databases]*. Moscow: Akademiya Publ.; 2016. 320 p. (In Russ.)

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; loginovskiyo@mail.ru.

Максимов Александр Александрович, д-р техн. наук, депутат, Государственная Дума Федерального Собрания Российской Федерации VIII созыва, Москва, Россия.

Захаров Вадим Владимирович, младший научный сотрудник кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; metkol@yandex.ru.

Щемлев Михаил Валерьевич, аспирант кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; главный технолог, ООО «КАМСС», Санкт-Петербург, Россия; 33333rudder@mail.ru.

Information about the authors

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

Alexander A. Maksimov, Dr. Sci. (Eng.), Deputy, State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation of the VIII convocation, Moscow, Russia.

Vadim V. Zakharov, Junior Researcher of the Department of Information and Analytical Support for Management in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; metkol@yandex.ru.

Mihail V. Shchemlev, Postgraduate Student of the Department of Information and Analytical Support of Management in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; Chief technologist, LLC “KAMSS”, Saint Petersburg, Russia; 33333rudder@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 29.08.2022

The article was submitted 29.08.2022

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА БАЗЕ ПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Д.С. Клыгач, klygachds@susu.ru
М.Г. Вахитов, vakhitovmg@susu.ru
Д.Г. Фомин, fomindg@susu.ru
А.С. Королев, korolevas@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Измерение электродинамических параметров, таких как диэлектрическая и магнитная проницаемости в широком диапазоне частот для сложных композитных материалов, остаётся актуальной задачей на сегодняшний день. Несмотря на то, что известны способы измерения в виде пластин, параллелепипедов или цилиндров, измерение свойств в широком диапазоне частот композитных материалов остаётся слабо исследованной темой. **Цель исследования:** обоснование возможностей использования полосково-щелевого перехода для измерения электродинамических параметров сложных композитных материалов. **Материалы и методы.** В статье представлены результаты исследований электродинамических параметров композитных материалов на основе измерителя в виде объёмного полосково-щелевого перехода. Данный переход позволяет выполнить измерение электродинамических параметров в диапазоне частот от 10 до 1400 МГц. Преимущество применения полосково-щелевого перехода в том, что при измерении электродинамических параметров нет необходимости придавать специальную форму (параллелепипед, цилиндр) исследуемым образцам. Это приводит к дополнительным технологическим трудностям и затратам времени на подготовку исследуемых образцов композитного материала. Исследуемые образцы композитного материала могут быть в виде сыпучей смеси. За счет этого сыпучий материал полностью займет внутреннее пространство полосково-щелевого перехода. Исследуемый композитный материал применяется при проектировании строительных материалов для обеспечения электромагнитной совместимости и представляет собой сыпучую смесь. **Результаты.** В статье приведены частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения в диапазоне частот при различных концентрациях материалов в итоговой смеси. **Заключение.** Описана технология получения композитных материалов с учетом концентрации компонентов в смеси. Композитные материалы представляют собой гибридный материал – сухую смесь электромагнитных (графитных) и диэлектрических частиц (перлита), а также цементно-полимерного вяжущего, предназначенную для нанесения радиопоглощающего покрытия на ограждающие конструкции. Дисперсные составы частиц перлита и графита близки и находятся в диапазоне 0,1...1 мм. Образцы смеси отличаются по составу объемным соотношением SiO₂/C.

Ключевые слова: СВЧ-измерения, метод Николсона – Росса – Вейера, S-параметры, порошковые материалы

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания FENU-2020-0019 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Для цитирования: Устройство для измерения диэлектрических свойств порошковых материалов на базе полосковой линии передачи / Д.С. Клыгач, М.Г. Вахитов, Д.Г. Фомин, А.С. Королев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 159–166. DOI: 10.14529/ctcr220416

A DEVICE FOR MEASURING THE DIELECTRIC PROPERTIES OF POWDER MATERIALS BASED ON A STRIPLINE TRANSMISSION

D.S. Klygach, *klygachds@susu.ru*

M.G. Vakhitov, *vakhitovmg@susu.ru*

D.G. Fomin, *fomindg@susu.ru*

A.S. Korolev, *korolevas@susu.ru*

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Measurement of electrodynamic parameters, such as dielectric and magnetic permeability in a wide frequency range for complex composite materials, remains an urgent task today. Despite the fact that measurement methods are known in the form of plates, parallelepipeds or cylinders, the measurement of properties in a wide range of frequencies of composite materials remains a poorly studied topic. **Purpose of the study:** substantiation of the possibilities of using a strip-slot transition for measuring the electrodynamic parameters of complex composite materials. **Materials and methods.** The article presents the results of studies of the electrodynamic parameters of composite materials based on a meter in the form of a volume strip-slot transition. This transition allows you to measure electrodynamic parameters in the frequency range from 10 MHz to 1400 MHz. The advantage of using a strip-slot transition is that when measuring electrodynamic parameters, there is no need to give a special shape (parallelepiped, cylinder) to the samples under study. This leads to additional technological difficulties and time-consuming preparation of the studied samples of the composite material. The investigated samples of the composite material can be in the form of a loose mixture. Due to this, bulk material completely occupies the internal space of the strip-slot transition. The investigated composite material is used in the design of building materials to ensure electromagnetic compatibility and is a loose mixture. **Results.** The article presents the frequency dependences of the reflection and transmission coefficients in the frequency range at different concentrations of materials in the final mixture. **Conclusion.** The technology for obtaining composite materials is described, taking into account the concentration of components in the mixture. Composite materials are a hybrid material – a dry mixture of electromagnetic (graphite) and dielectric particles (perlite), as well as a cement-polymer binder, intended for applying a radio-absorbing coating on building envelopes. The disperse compositions of perlite and graphite particles are close and are in the range of 0.1...1 mm. Samples of the mixture differ in composition by the SiO₂/C volume ratio.

Keywords: microwave measurements, Nicholson–Ross–Weier method, S-parameters, powder materials

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state task FENU-2020-0019 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Klygach D.S., Vakhitov M.G., Fomin D.G., Korolev A.S. A device for measuring the dielectric properties of powder materials based on a stripline transmission. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(4):159–166. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220416

Введение

Одним из направлений исследований на сегодняшний день является разработка новых материалов с заданными свойствами. Примером таких материалов являются материалы на основе ферритов с различными добавками. Такие материалы находят применение в различных отраслях науки и техники в качестве магнитотвердых материалов для постоянных магнитов и магнитных композитов, устройств хранения информации, магнитооптических устройств [1, 2]. В последние годы эти материалы все чаще находят применение в устройствах миллиметрового и субтерагерцового диапазонов частот. Такими устройствами являются, например, настраиваемые резонаторы [3], изоляторы [4] и радиопоглощающие покрытия, в которых ферриты применяют как в виде пленок, так и в виде объемных материалов. Перспективным направлением исследований является создание материалов с минимальной отражающей способностью электромагнитного излучения

для защиты крупных объектов [5, 6]. Основное требование к материалам – поглощение в широком диапазоне частот [7].

В СВЧ (ГГц) области наибольший интерес представляют ферриты, легируя которые, можно менять частоту ферромагнитного резонанса (ФМР). В то же время ферриты могут быть использованы в качестве излучателей в информационно-телекоммуникационных системах, где, с одной стороны, важен низкий уровень потерь, а с другой стороны, повышение частоты ФМР, что может быть достигнуто частичным замещением атомов железа в матрице гексаферритов легирующим элементом, расширяет возможности приборов и устройств на основе такого материала. В частности, переход к частотам до 100 ГГц и выше обеспечит повышение объемов передачи данных между спутниками. Это приведет к развитию телекоммуникационных услуг нового поколения на базе космических систем [8, 9]. В силу всего перечисленного изучение различных физических свойств этих материалов представляет как научный [10], так и практический интерес.

СВЧ-техника и технологии широко распространены в современных информационно-телекоммуникационных устройствах, в том числе в системах связи, в системах управления воздушным движением и т. д. С переходом радиоэлектронных систем в более высокочастотные диапазоны возникает необходимость точного определения параметров используемых диэлектрических материалов. Ярким примером СВЧ-устройств, электрические параметры которых сильно зависят от используемых материалов, являются: печатные излучающие элементы, сумматоры и делители мощности, согласующие топологии для активных элементов и многие другие элементы антенно-фидерного тракта. Основной проблемой, связанной с применением диэлектрических материалов в составе перечисленных СВЧ-устройств, является то, что отклонение значения их относительной диэлектрической проницаемости от расчетного значения ведет к увеличению коэффициента отражения и, как следствие, к потерям мощности, которая рассеивается в СВЧ-тракте в виде тепла. В результате повышается вероятность высокочастотного пробоя СВЧ-тракта, уменьшается время наработки СВЧ-устройства на отказ, увеличиваются тепловые потери, повышается коэффициент шума (для приемных устройств). Для предотвращения всех перечисленных проблем начиная с 1950-х годов возникло новое направление развития электроники – материаловедение в области высоких частот.

Целью данного направления является исследование применяемых в СВЧ-устройствах материалов, позволяющее радиоинженерам заранее с высокой точностью определять конструктивные особенности проектируемых устройств. Так, появилось большое разнообразие методов и техник измерения диэлектрических параметров материалов в широком диапазоне частот. Одним из наиболее популярных способов является метод Николсона – Росса – Вейера, позволяющий оценивать диэлектрические свойства материалов при измерении S-параметров в комплексной форме. Авторами настоящей работы представлено новое компактное устройство на базе полосковой линии передачи, предназначенное для измерения диэлектрических свойств порошковых материалов методом Николсона – Росса – Вейера.

В данной статье исследуется возможность применения симметричной полосковой линии с воздушным заполнением для определения диэлектрических свойств порошкового материала ИКУР (ТУ 23.64.10-008-21491261-2021). Данный способ измерений позволяет использовать значительно меньше исследуемого материала, чем в аналогичных исследованиях с применением коаксиального измерителя. Кроме того, применение полоскового измерителя позволяет воплотить принцип модульности при его реализации.

1. Конструкция измерительного устройства

Конструкция предлагаемого устройства для измерения диэлектрических свойств порошковых материалов (рис. 1) представляет собой воздушную полосковую линию 1, расположенную в металлическом корпусе 2. Для подключения используются SMA разъемы 3 с волновым сопротивлением 50 Ом. Стоит отметить, что для обеспечения возможности размещения исследуемого порошкового материала в конструкции измерительного устройства используется крышка 4. Сечение полосковой линии – 4×2 мм, что обеспечивает волновое сопротивление 50 Ом при воздушном заполнении корпуса. Размеры внутренней полости корпуса составляют $25 \times 15 \times 6$ мм. Таким образом, исследуемое измерительное устройство обладает малым внутренним объемом, что позволяет проводить измерения с малым количеством исследуемого порошкового материала.

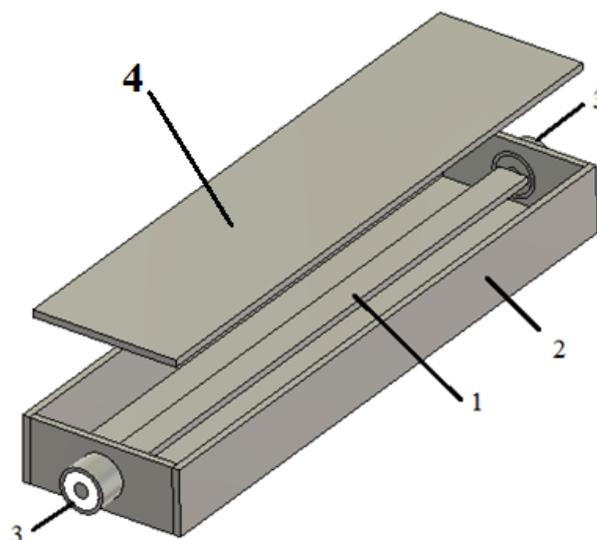


Рис. 1. Конструкция устройства для измерения диэлектрических свойств порошковых материалов на базе полосковой линии передачи
Fig. 1. The design of a device for measuring the dielectric properties of powder materials based on a stripline transmission

2. Диэлектрические свойства материалов

Диэлектрические свойства материалов в математическом представлении – это комплексное число, описывающее взаимодействие материала с электрическим полем:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''; \quad (1)$$

$$\varepsilon' = \varepsilon_r \varepsilon_0; \quad (2)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta, \quad (3)$$

где ε' – реальная часть диэлектрической проницаемости; ε'' – мнимая часть диэлектрической проницаемости (коэффициент диэлектрических потерь); ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; δ – угол диэлектрических потерь.

Так, реальная часть диэлектрической проницаемости ε' определяет количество запасенной энергии внешнего электрического поля в материале. Мнимая часть диэлектрической проницаемости ε'' определяет долю потерь относительно внешнего электрического поля. Тангенс угла диэлектрических потерь определяет отношение энергии потерь в материале к энергии, запасенной в материале:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\text{Энергия потерь}}{\text{Энергия запасенная}}. \quad (4)$$

Приведенные в соотношениях (1)–(4) физические величины (ε' , ε'') являются функциями частоты. Основная идея представленных ниже методов – определение диэлектрической проницаемости материалов в широком диапазоне частот.

3. Методика определения диэлектрических характеристик материала

Основная идея способа заключается в измерении комплексного коэффициента пропускания (S21) и комплексного коэффициента отражения (S11), когда тестовый сигнал проходит через замкнутую линию передачи без образца тестируемого материала и с образцом. [8–13]. Для измерений используются векторные сетевые анализаторы (VNA). Математическая обработка результатов осуществляется по методу Николсона – Росса – Вейера [8].

Основные соотношения, используемые в математической модели Николсона – Росса – Вейера, для материала толщиной d , установленного в воздушно-диэлектрической коаксиальной линии, показаны на рис. 2.

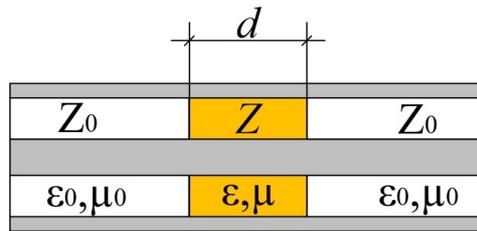


Рис. 2. Воздушно-диэлектрическая полосовая линия с образцом испытываемого материала
Fig. 2. Air-dielectric stripline with test material sample

Радиопоглощающая смесь ИКУР представляет собой гибридный материал – сухую смесь электромагнитных (графитных) и диэлектрических частиц (перлита), а также цементно-полимерного вяжущего, предназначенную для нанесения радиопоглощающего покрытия на ограждающие конструкции. В покрытии формируется дисперсная система C–SiO₂ с развитой внутренней удельной поверхностью за счет поверхности раздела фаз и значительной внутренней пористости частиц вспученного перлита, способствующей максимальному переотражению электромагнитных волн в структуре между графитными частицами. Дисперсные составы частиц перлита и графита близки и находятся в диапазоне 0,1...1 мм. Образцы смеси отличаются по составу объемным соотношением SiO₂/C, составы приведены в таблице.

Образцы смесей материала для измерения S-параметров
Material mix samples for S-parameter measurements

Номер образца	Объемное соотношение SiO ₂ /C
1	2/1
2	1/1
3	1/2
4	1/3

4. Экспериментальное исследование измерителя порошковых материалов на базе полосковой линии передачи

Для экспериментального исследования измерителя порошковых материалов на базе полосковой линии передачи разработан макет (рис. 3). На рис. 4 приведена экспериментальная установка.

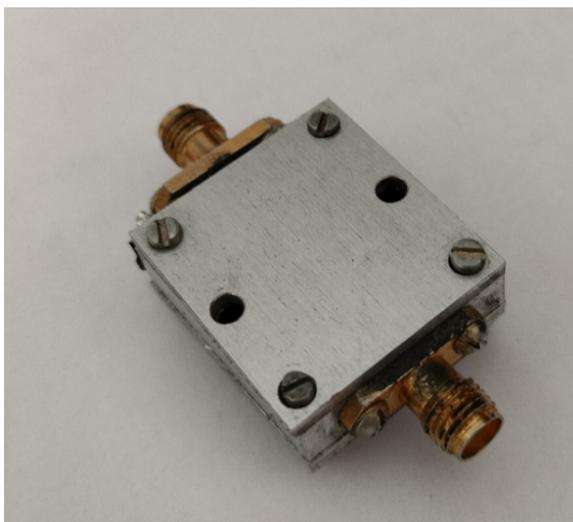


Рис. 3. Макет полосковой линии передачи
Fig. 3. Stripline layout

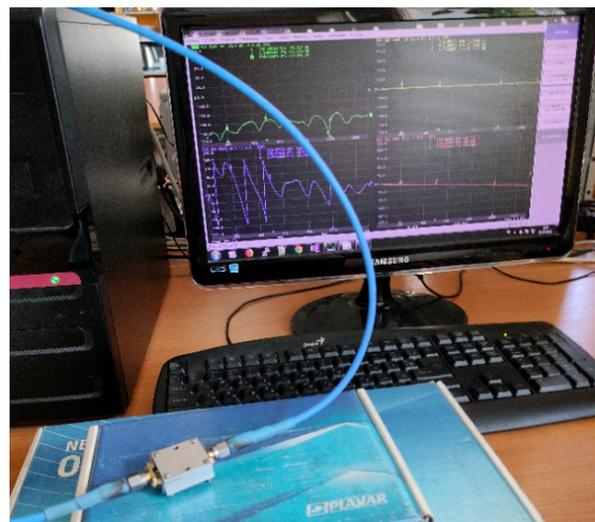


Рис. 4. Экспериментальная установка
Fig. 4. Experimental setup

Макет реализован с использованием модульного принципа построения [14, 15].

5. Результат измерения

Результаты измерения S-параметров образцов материалов приведены на рис. 5–8.

Результаты измерения потерь в образцах приведены на рис. 9.

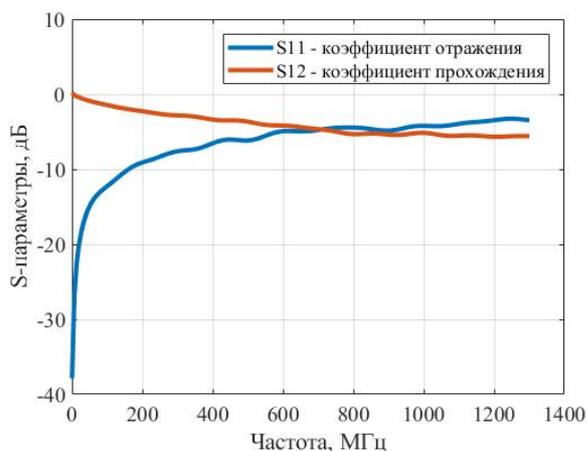


Рис. 5. Частотная зависимость S-параметров для образца № 1
Fig. 5. Frequency dependence of S-parameters for sample No. 1

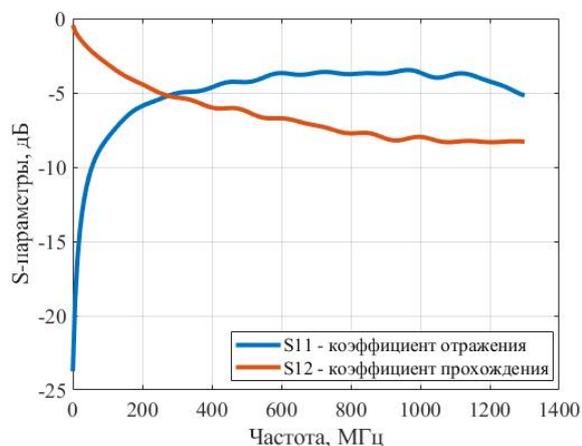


Рис. 6. Частотная зависимость S-параметров для образца № 2
Fig. 6. Frequency dependence of S-parameters for sample No. 2

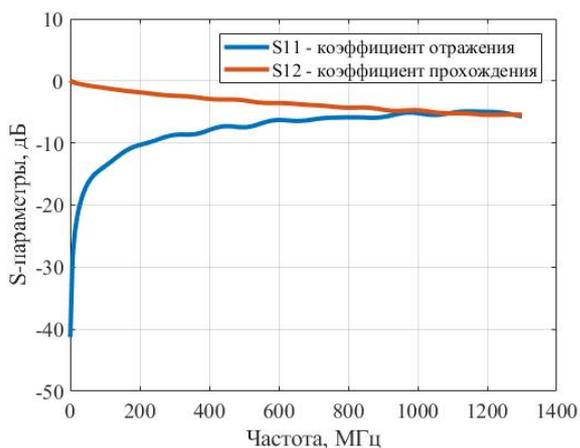


Рис. 7. Частотная зависимость S-параметров для образца № 3
Fig. 7. Frequency dependence of S-parameters for sample No. 3

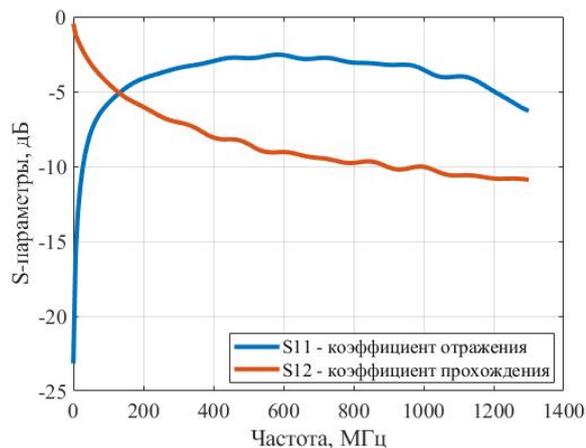


Рис. 8. Частотная зависимость S-параметров для образца № 4
Fig. 8. Frequency dependence of S-parameters for sample No. 4

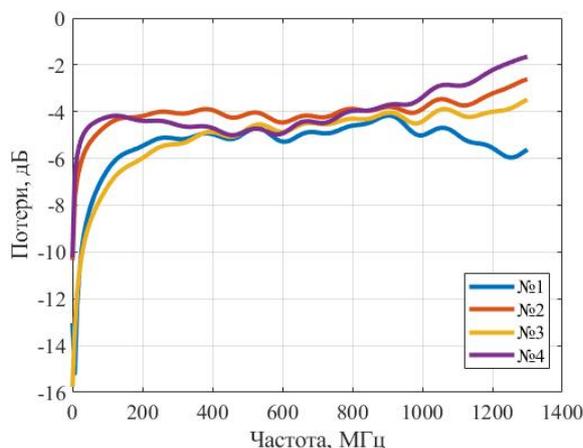


Рис. 9. Частотная зависимость потерь в исследованных образцах
Fig. 9. Frequency dependence of losses in the studied samples

Исследуемые материалы были засыпаны в пространство между полоском и стенками корпуса. Из полученных графиков видно, что в диапазоне частот не наблюдаются шумы и скачкообразные изменения S-параметров, как это наблюдалось при измерении параметров материала с помощью коаксиальной линии передачи [16].

Из полученных результатов измерения видно, что в области от 10 до 700 МГц материалы практически не поглощают электромагнитную энергию. В диапазоне частот от 700 до 1300 МГц начинается уменьшение амплитуды электромагнитной волны. Коэффициент отражения S_{11} уменьшается, т. е. волна проходит в материал, поскольку коэффициент практически не изменяется, это показывает, что амплитуда волны уменьшается и электромагнитная волна затухает при прохождении через материал (см. рис. 9).

Применение предложенной методики позволяет выявить разницу в поглощающей способности материалов разного состава. Наглядно (см. рис. 9) различие на высоких частотах уровня поглощения электромагнитных волн, с повышением содержания электромагнитных частиц отражающая способность растет, а поглощающая падает.

Заключение

В работе представлены результаты теоретического исследования устройства для измерения диэлектрических свойств порошковых материалов на базе полосковой линии передачи. Представлена конструкция устройства измерения. Достоинством представленной конструкции является малый объем его внутренней полости, что позволяет проводить измерения порошковых материалов, используя небольшое их количество. Исследование электрических характеристик предлагаемого устройства показало отсутствие резонансных зависимостей, а также плавное изменение амплитудно-фазовых зависимостей коэффициентов передачи и отражения в диапазоне частот. Таким образом, на основании проведенного теоретического исследования можно сделать выводы о высоком потенциале применения предлагаемого устройства для измерения диэлектрических свойств порошковых материалов методом Николсона – Росса – Вейера.

Список литературы/References

1. Zhang W., Peng B., Zhang W., Zhou S., Schmidt H. Ultra large coercivity in barium ferrite thin films prepared by magnetron sputtering. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2010;322:1859–1862.
2. Xu H., Zhang W., Peng B., Zhang W. Properties of barium hexa-ferrite thin films dependent on sputtering pressure. *Applied Surface Science*. 2011;257:2689–2693.
3. Song Y.-Y., Ordóñez-Romero C.L., Wu M. Millimeter wave notch filters based on ferromagnetic resonance in hexagonal barium ferrites. *Appl. Phys. Lett.* 2009;95:142506.
4. Harris V.G. Modern microwave ferrites. *IEEE Trans. Mag.* 2012;48:1075–1104.
5. Cho H.S., Kim S.S. M-Hexaferrites with planar magnetic anisotropy and their application to high-frequency microwave absorbers. *IEEE Transact. Magn.* 1999;35:3151–3153. DOI: 10.1109/20.801111
6. Matsumoto M., Miyata Y.A. Gigahertz-range electromagnetic wave absorber with wide bandwidth of hexagonal ferrite. *J. Appl. Phys.* 1996;79:5486–5488.
7. Ghasemi A., Hossienpour A., Morisako A., Liu X., Ashrafizadeh A. Investigation of the microwave absorptive behavior of doped barium ferrites. *Mater. Design*. 2008;29:112–117.
8. Nicolson A.M., Ross G.F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time domain techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 1970;19(4):377–382. DOI: 10.1109/TIM.1970.4313932
9. Sahin S., Nahar N.K., Sertel K. Simplified Nicolson-Ross-Weir Method for Material Characterization Using Single-Port Measurements. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2020;10(4):404–410. DOI: 10.1109/TTHZ.2020.2980442
10. Luukkonen O., Maslovski S.I., Tretyakov S.A. Stepwise Nicolson-Ross-Weir-Based Material Parameter Extraction Method. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2011;10:1295–1298. DOI: 10.1109/LAWP.2011.2175897
11. Rothwell E.J., Frasc J.L., Ellison S.M., Chahal P., Ouedraogo R.O. Analysis of the Nicolson-Ross-Weir Method for Characterizing the Electromagnetic Properties of Engineered Materials. *Progress in Electromagnetics Research*. 2016;157:31–47. DOI: 10.2528/PIER16071706

12. Severo S.L.S., de Salles A.A.A., Nervis B., Zanini B.K. Non-resonant Permittivity Measurement Methods. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. 2017;16(1):297–311. DOI: 10.1590/2179-10742017v16i1890

13. Weir W.B. Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies. *Proceedings of the IEEE*. 1974;62(1):33–36. DOI: 10.1109/PROC.1974.9382

14. Dudarev N.V., Fomin D.G., Darovskikh S.N. Scattering matrix simulation of broadband band-pass filter based on a multilayer technology. In: *2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)*. Dolgoprudny, Russia; 2021. DOI: 10.1109/EnT50460.2021.9681721

15. Dudarev N.V., Fomin D.G., Darovskikh S.N., Klygach D.S., Vakhitov M.G. The Volume-Modular Technology in the Design of Passive Microwave Devices. In: *Proceedings – 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2021*; 2021. P. 225–227. DOI: 10.1109/USBEREIT51232.2021.9455051

16. Klygach D., Vakhitov M., Khashimov A., Zhivulin V., Vinnik D., Sherstyuk D. Determination of the Optimal Sample Size for Measurement in a Coaxial Transmission Line. In: *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*; 2020. P. 322–325. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117619

Информация об авторах

Клыгач Денис Сергеевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доц. кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; klygachds@susu.ru.

Вахитов Максим Григорьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доц. кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; vakhitovmg@susu.ru.

Фомин Дмитрий Геннадьевич, младший научный сотрудник кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; fomindg@susu.ru.

Королев Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доц. кафедры строительных конструкций и сооружений, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; korolevas@susu.ru.

Information about the authors

Denis S. Klygach, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Ass. Prof. of the Department of Design and Manufacture of Radio Equipment, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; klygachds@susu.ru.

Maksim G. Vakhitov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Ass. Prof. of the Department of Design and Manufacture of Radio Equipment, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; vakhitovmg@susu.ru.

Dmitriy G. Fomin, Junior Researcher of the Department of Infocommunication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; fomindg@susu.ru.

Aleksandr S. Korolev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Building Structures and Constructions, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; korolevas@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 20.09.2022

The article was submitted 20.09.2022

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 ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки: 2.3.1 (05.13.01) – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки); 2.3.3 (05.13.06) – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки); 2.3.4 (05.13.10) – 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»
2022. Том 22, № 4

16+

Редакторы: *С.И. Уварова, Д.С. Замалутдинова*
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 24.10.2022. Дата выхода в свет 31.10.2022. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 19,53. Тираж 500 экз. Заказ 380/335. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.