

ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2020
Т.20, № 3

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:

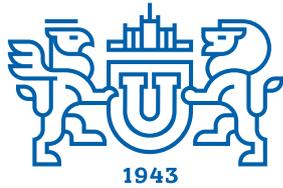
- Автоматизированные системы управления в энергосбережении
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами
- Антенная техника
- Инфокоммуникационные технологии
- Информационно-измерительная техника
- Навигационные приборы и системы
- Радиотехнические комплексы
- Системы автоматизированного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

Редакционная коллегия:

Шестаков А.Л., д.т.н., проф. (гл. редактор) (г. Челябинск);
Бурков В.Н., д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (зам. гл. редактора) (г. Москва);
Логиновский О.В., д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (зам. гл. редактора) (г. Челябинск);
Голлай А.В., к.х.н., доц. (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:

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

2020

Vol. 20, no. 3

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:

Shestakov A.L., Dr. of Sci. (Eng.), Prof. (*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;
Loginosvkiy O.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*deputy editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
Gollai A.V., Cand. of Sci. (Eng.), Ass. Prof. (*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:

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;
Ukhotov 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

БОЛОДУРИНА И.П., УШАКОВ Ю.А., УШАКОВА М.В. Методика получения обобщенных статистических характеристик сетевого оборудования для создания имитационных моделей 5

Управление в технических системах

КОПОТЕВА А.В. Использование геометрической прогрессии для определения параметров функций принадлежности при настройке нечеткого регулятора ПИ-типа 18

НЕТБАЙ Г.В., ОНИСКИВ В.Д., СТОЛБОВ В.Ю., КАРИМОВ Р.Р. Прогнозное управление локальной городской системой теплоснабжения на основе нейросетевого моделирования 29

VOLKOVA K.M. Integration of Fire Protection Systems Based on the Digital Automatic Model 39

Инфокоммуникационные технологии и системы

САПОЖНИКОВ А.Ю., КУЗНЕЦОВ А.А., МАВРИНА А.С., КУЛИКОВ Г.Г. Применение цифрового двойника информационной платформы предприятия в производственных и учебных процессах с учетом функционально-стоимостных и временных ограничений (на примере бизнес-процессов базовой кафедры информационных технологий) 47

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

BUSHUEV O.Yu., TUGOVA E.S., MOTORINA M.A. Algorithms for In-line Pressure Transmitters Condition Monitoring 57

Управление в социально-экономических системах

БАРКАЛОВ С.А., АВЕРИНА Т.А., БРЕЖНЕВА З.О. Формирование оценочной модели управления ресурсным взаимодействием стейкхолдеров в проекте 66

БАРКАЛОВ С.А., ГЛУШКОВ А.Ю., МОЙСЕЕВ С.И. Динамическая модель разработки и реализации проекта под влиянием внешних факторов 76

ВАРЛАМОВА С.А., КОТКОВ П.В. Моделирование показателя развития человеческого потенциала в Германии 85

ЛОГИНОВСКИЙ О.В., ЗОЛОТЫХ С.А., ХАЛДИН А.С. Формирование стратегии социально-экономического развития субъекта РФ в современных условиях 96

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

PROKUDINA L.A., VIKHIREV M.P. Computational Modeling of Liquid Film Flow Regimes in Heat and Mass Transfer Devices at Low Reynolds Numbers 104

ЯЧИКОВ И.М., ШИРЯЕВ В.И. Определение динамических параметров постоянного магнита при его удержании в импульсном магнитном поле 111

Краткие сообщения

ГУСЕВ Е.В. Некоторые аспекты повышения надежности управленческих решений в строительстве ... 123

LOGINOVSKIY O.V., KOSTYLEVA E.M., YASHNIKOV I.M. Optimization of the Lining Wear Coefficient on the Basis of Control of Three-phase Current Electric Arcs Characteristics 129

ZAKHAROV V.V., RYBAK V.L. Blockchain Technology and the Possibilities of Its Use 135

ШИНКАРЕВ А.А., КОВАЛЬ М.Е. Коммуникация как ключевой элемент построения полезных корпоративных информационных систем 140

КУЛИКОВ Г.Г., СУВорова В.А., ШИЛИНА М.А., ХИСАМЕТДИНОВА А.К. Системный подход к информационному моделированию интеллектуального управления временными ресурсами в предметно-ориентированной области (на примере управления расписанием занятий университета) .. 146

CONTENTS

Informatics and Computer Engineering

- BOLODURINA I.P., USHAKOV Yu.A., USHAKOVA M.V. Method of Obtaining Generalized Statistical Characteristics of Network Equipment for Creation of Simulation Models 5

Control in Technical Systems

- KOPOTEVA A.V. PI-type Fuzzy Controller Tuning by Membership Functions Parameters Determination Using Geometric Series 18
- NETBAY G.V., ONISKIV V.D., STOLBOV V.Yu., KARIMOV R.R. Management of a Local Urban Heat Supply System Based on Neural Network Modeling Taking into Account the Weather Forecast 29
- VOLKOVA K.M. Integration of Fire Protection Systems Based on the Digital Automatic Model 39

Infocommunication Technologies and Systems

- SAPOZHNIKOV A.Yu., KUZNETSOV A.A., MAVRINA A.S., KULIKOV G.G. Application of the Digital Twin of the Enterprise Information Platform in Production and Educational Processes Accounting Functional, Cost and Time Constraints (on the Example of Business Processes of the Information Technology Basic Chair) 47

Instrument Engineering, Metrology and Information and Measuring Devices and Systems

- BUSHUEV O.Yu., TUGOVA E.S., MOTORINA M.A. Algorithms for In-line Pressure Transmitters Condition Monitoring 57

Control in Social and Economic Systems

- BARKALOV S.A., AVERINA T.A., BREZHNEVA Z.O. Formation of an Assessment Model for Resource Interaction of Stakeholders in the Project 66
- BARKALOV S.A., GLUSHKOV A.Yu., MOISEEV S.I. Dynamic model of development and implementation of the project under the influence of external factors 76
- VARLAMOVA S.A., KOTKOV P.V. Modeling the Indicator of Human Potential Development in Germany 85
- LOGINOVSKIY O.V., ZOLOTYKH S.A., KHALDIN A.S. Formation of the Strategy of Socio-economic Development of the Subject of the Russian Federation in Modern Conditions 96

Automated Process Control Systems

- PROKUDINA L.A., VIKHIREV M.P. Computational Modeling of Liquid Film Flow Regimes in Heat and Mass Transfer Devices at Low Reynolds Numbers 104
- YACHIKOV I.M., SHIRYAEV V.I. Determination of Dynamic Parameters of a Permanent Magnet While I Hold in a Pulse Magnetic Field 111

Brief Reports

- GUSEV E.V. Significant Features of Improving Reliability of Decision-Making in Construction Management 123
- LOGINOVSKIY O.V., KOSTYLEVA E.M., YACHIKOV I.M. Optimization of the Lining Wear Coefficient on the Basis of Control of Three-phase Current Electric Arcs Characteristics 129
- ZAKHAROV V.V., RYBAK V.L. Blockchain Technology and the Possibilities of Its Use 135
- SHINKAREV A.A., KOVAL M.E. Communication as Key Aspect in Development of Beneficial Enterprise Information Systems 140
- KULIKOV G.G., SUVOROVA V.A., SHILINA M.A., KHISAMETDINOVA A.K. A Systematic Approach to Information Modeling the Intellectual Management of Time Resources in the Subject Oriented Field (for Example, Control of the Timetable of the University) 146

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ОБОБЩЕННЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

И.П. Болодурина, Ю.А. Ушаков, М.В. Ушакова

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия

Работа посвящена проблеме разработки моделей сетевого оборудования, которые точно воспроизводят работу реального оборудования по временным характеристикам.

Цель исследования. Данное исследование направлено на разработку методики, которая позволяет быстро получать модели, статистически совпадающие по поведению выбранных параметров с реальным измеренным оборудованием на существующих открытых системах моделирования.

Методы. Для получения параметров производительности и временных характеристик реального оборудования создана методика, включающая планирование эксперимента для получения статистических данных в широком диапазоне входных интенсивностей трафика, конфигурацию и схему соединения оборудования, включающую внешнее управление коммутатором для тестирования влияния различных настроек на производительность и время обработки пакета, скрипты для автоматизации создания тестовых наборов трафика с требуемыми параметрами распределения времени между пакетами, схему подключения через контейнерные службы и схему съема дампов трафика. В методику не вошло тестирование работы выходных очередей, целью было исследовать и перенести в модель процессы, происходящие до помещения фреймов в исходящие очереди интерфейсов. В качестве среды моделирования использовался пакет с открытым исходным кодом Omnet++.

Результаты. В работе изучена структура существующего модельного коммутатора Omnet++, выявлены недостатки, влияющие на точность и достоверность результатов, предложен метод реализации линий модельной задержки на основе интерполяции таблиц временных параметров, полученных по результатам реальных данных для требуемого сочетания параметров трафика и входящих интерфейсов. Для апробации разработанных подходов разработан тестовый стенд на реальном оборудовании, сформирован план экспериментальных исследований, реализован скрипт автоматического тестирования по заданному плану, проведено тестирование в режиме обычной коммутации фреймов и в режиме коммутации на основе таблиц Openflow. Также получены временные характеристики промежуточного оборудования для учета их влияния на результаты эксперимента. По полученным результатам проведен эксперимент на модели в среде Omnet++. Поскольку полученные выборки при статистическом анализе показали виды распределений, отличные от нормальных и экспоненциальных, для сравнения средних использовался статистический U-критерий Манна–Уитни.

Заключение. Полученные результаты при уровне значимости 0,05 подтвердили работоспособность данного подхода при создании моделей, более точно описывающих временные характеристики процессов обработки трафика в сетевом оборудовании.

Ключевые слова: моделирование, имитационная модель, коммутация, задержки.

Введение

Современные высокоскоростные сети передачи данных должны обладать предсказуемым поведением при любых сочетаниях параметров проходящего трафика и настроек оборудования. Основной единицей построения высокоскоростных магистралей до конечного оборудования являются коммутаторы, которые постепенно усложнялись, увеличивая функциональность. На сегодняшний день провайдеры начинают использовать оборудование на основе программно-

конфигурируемых сетей, которые предоставляют более гибкие подходы к управлению трафиком. Повсеместное внедрение виртуализации увеличивает требования к оборудованию, так как коммутаторы должны совмещать разнородный трафик виртуальных сервисов, особенно для подхода с использованием виртуализации сетевых функций (NFV, Network Function Virtualization) [1]. Основной проблемой использования совместно всех этих инструментов является прогнозирование задержек, потери пакетов, размеров очередей для обеспечения требуемого качества обслуживания (QoS). Исследование таких сетей часто выполняют на моделях, к которым предъявляются повышенные требования к точности воспроизведения условий реального оборудования.

Имитационное моделирование предоставляет широкие возможности для исследований и позволяет получить результаты, сопоставимые с результатами реального оборудования, но только в случае точного описания всех механизмов работы и их временных и нагрузочных характеристик. Этот подход дает возможность проведения экспериментов без построения реальной сети, что существенно снижает временные и финансовые затраты [2].

На сегодняшний день существует довольно большое количество систем моделирования сети. Они используют в своей работе данные о количестве узлов, конфигурации связей, скоростях передачи данных, используемых протоколах и видах оборудования, а также о выполняемых в сети приложениях [3].

Большинство систем имитационного моделирования позволяют не строить модель с нуля, а использовать готовые модели основных элементов сети, таких как, например, некоторые типы маршрутизаторов, каналы связи, протоколы и т. д. В результате тестовых испытаний реального оборудования и анализа принципов их работы создается библиотека типовых элементов сети, которые можно настраивать с помощью заранее предусмотренных в моделях параметров. Использование библиотек готовых решений существенно упрощает разработку модели сети. Тем не менее высокие темпы развития сетевых технологий приводят к тому, что существующие модели не удовлетворяют потребностям разработчиков.

Моделирование сетевой инфраструктуры на основе ПКС имеет ряд особенностей [4]. Во-первых, время принятия решений по коммутации и маршрутизации в таком оборудовании практически не отличается и зависит только от реализации поиска в таблицах OpenFlow в реактивном режиме (с заранее загруженными данными о топологии). Во-вторых, отличается профиль нагрузки на процессор и память при прохождении трафика. В-третьих, такое оборудование может работать в гибридных режимах, когда часть портов работает в режиме ПКС, а остальные в режиме традиционной коммутации или маршрутизации.

Работа очередей в таких системах не отличается от традиционных коммутаторов и маршрутизаторов, кроме того, что настройка параметров этих очередей может происходить динамически. Создание моделей, в которых используется также проактивный режим работы ПКС, требует введения в процесс коммутации и маршрутизации процесса работы стороннего приложения на внешнем сервере, доступного также через сеть передачи данных с заранее неизвестными параметрами по реакции на нагрузку [5].

Получение характеристик оборудования и программных модулей возможно при помощи прогона стресс-тестирования, причем при использовании ПКС можно генерировать трафик и принимать его с помощью только механизмов протокола OpenFlow в проактивном режиме. Для минимизации влияния времени запроса и ответа к серверу все остальные процессы, кроме генерации приема трафика, должны проходить в реактивном режиме с минимально необходимыми размерами таблиц. Стресс-тестирование на реально работающих сетях связано с трудностями сосуществования синтетического и реального трафиков. С точки зрения получения всех возможных вариантов и сочетаний характеристик оборудования такой режим позволит создать модели только для нагрузки равной или выше существующей. Поскольку при использовании ПКС можно снимать очень подробную статистику с каждой единицы оборудования, есть возможность проводить такие стресс-тесты по дереву связанных коммутаторов и маршрутизаторов, одновременно снимая характеристики со всех устройств на одном и том же паттерне трафика.

В данной работе рассмотрена методика расширения возможностей по моделированию внутренних процессов коммутатора в среде OMNeT++ с использованием фреймворка INET, который обладает широким набором уже готовых компонентов для описания различных элементов сети [6].

1. Снятие характеристик реального сетевого оборудования для целей модельного исследования

При моделировании сетевого оборудования применяют несколько степеней детализации и, соответственно, уровней декомпозиции. Большинство модельных исследований коммутаторов ориентируются на изучение пропускной способности, задержек, потерь пакетов, поведения очередей, что требует детализации до уровня интерфейсов, но не внутренних процессов принятия решений, поиска адресов, классификации, фильтрации и прочих важных процессов. Зависимость задержки обработки пакета от типа настроек и их количества бывает очень существенной и нелинейной. Вероятность потери пакета во время обработки внутренними программными модулями, его фильтрации, изменения существенных полей заголовков, влияющих на попадание в разные очереди, не учитываются в стандартных моделях большей части систем моделирования [7].

Рассмотрим схему прохождения пакета сквозь коммутатор. Для примера возьмем программное обеспечение для коммутатора: Cisco IOS – как наиболее полно отражающее все функции коммутатора в кампусных сетях, Mikrotik – как представителя Linux коммутации и маршрутизации, Huawei – как представителя альтернативного подхода к распределению управления потоком данных. Общая схема прохождения пакета при условии коммутации второго уровня выглядит, как показано на рис. 1. Порядок действий у разных производителей может отличаться, некоторых шагов может не быть или, наоборот, имеются дополнительные, но сам принцип соблюдается. Все необходимые действия на входе в интерфейс выполняются последовательно, внося задержку [8]. Каждое действие внутри состоит из расчетов (например, в профилировщиках и ограничителях потока), множества сравнений со списками переменной длины (фильтры, модификаторы, классификаторы), доступом к общей ассоциативной программной памяти (быстрая коммутация) или аппаратным способам работы с таблицами TCAM (классическая коммутация) [9].

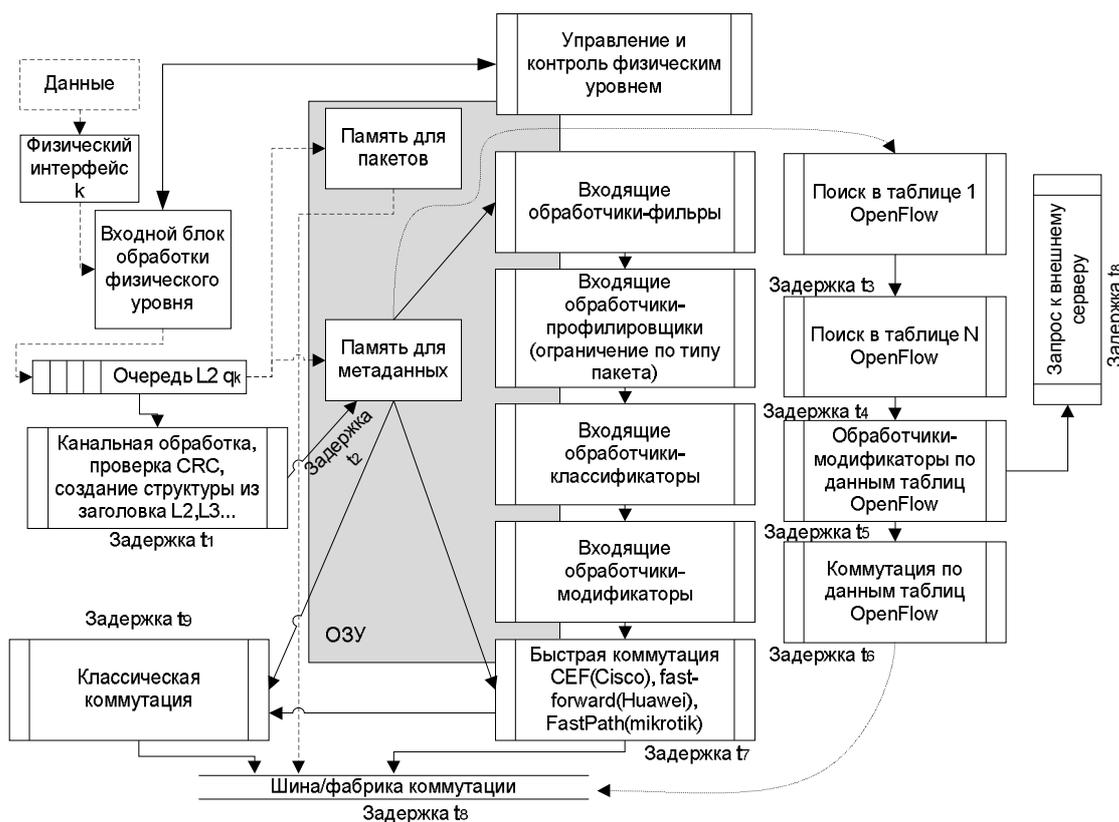


Рис. 1. Схема обработки данных на входе в коммутатор
Fig. 1. Switch input data processing scheme

Большую задержку могут вносить длинные списки в операциях фильтрации, классификации и модификации, а также занятость процессора, памяти и аппаратных модулей при работе с внешними данными (кэшами и таблицами). Влияние нагрузки процессора, количества запросов к па-

мноты и модулям на общую задержку может быть весьма существенным, поэтому в современных коммутаторах разделяют уровень управления и уровень передачи данных и часто выделяют им свои процессоры/ядра и память. Но общее влияние всех этих процессов может быть существенно [10]. Так, Mikrotik заявляет о двукратном снижении производительности при включении фильтрации. В коммутаторах Cisco часть фильтров ACL, Route-map обрабатывается в аппаратных TCAM-таблицах (например, в Catalyst 4500 только по маскам подсетей /24 и /32), остальные фильтры обрабатываются процессором и снижают общую производительность.

Общую задержку прохождения пакета через коммутатор можно принять за сумму задержек обработки, ожидания в очереди, отправки.

$$t_{switch} = t_{process} + t_{queue} + t_{transmit}, \quad (1)$$

где $t_{process}$ – суммарное время обработки пакета от получения последнего бита на входе до помещения пакета в очередь; t_{queue} – время ожидания в очереди; $t_{transmit}$ – время на передачу данных в линию связи, для полнодуплексных линий $t_{transmit} = L / C$, где L – длина передаваемых данных, вместе с преамбулой и окончанием, в бит; C – скорость линии, в бит/с.

Рассмотрим состав задержки обработки

$$t_{process} = \sum_i (t_i n_i + t'_i n'_i + t_i^{wait} + t_i'^{wait}), \quad (2)$$

где t_i – время выполнения одной операции i -го блока обработки в программном режиме; n_i – количество операций i -го блока обработки, выполняемого программным способом, для каждого пакета может быть разным; t'_i – время выполнения одной операции i -го блока обработки в аппаратном режиме; n'_i – количество операций i -го блока обработки, выполняемого аппаратными модулями, для каждого пакета может быть разным; t_i^{wait} – суммарное время ожидания доступа к разделяемым ресурсам процессора при выполнении i -го блока в программном режиме; $t_i'^{wait}$ – суммарное время ожидания доступа к разделяемым ресурсам процессора при выполнении i -го блока в аппаратном режиме.

Поскольку современный коммутатор – устройство с несколькими вычислительными ядрами, десятками интерфейсов, современной операционной системой и несколькими шинами данных, задержка выполнения каждой операции может варьироваться в широких пределах, но не будет менее $t_i n_i + t'_i n'_i$. Поскольку максимальное значение суммарной задержки зависит от ожидания доступа к ресурсам при повышении нагрузки на коммутатор в целом, необходимо оценить вероятности возникновения доступа к разделяемым ресурсам [11].

Наложение множества независимых случайных потоков приводит к простейшему потоку с экспоненциальным законом распределения [12]. Функция распределения $F(t)$ времени t между поступлениями двух задач обработки одного класса (задач работы с одними разделяемыми ресурсами) определяется как

$$F(t) = 1 - e^{-t \cdot \lambda_i}, \quad (3)$$

где λ_i – интенсивность поступления задач одного класса.

Получение данных о задержке обработки пакета в реальном коммутаторе возможно из длины входной очереди q_i (для коммутаторов с аппаратными обработчиками портов, например в Cisco – командой `show buffers input-interface`, в Linux длины очереди драйвера через утилиту `eth-tool` с ключом `-S`, для OpenvSwitch – командой `ovs-ofctl queue-stats`).

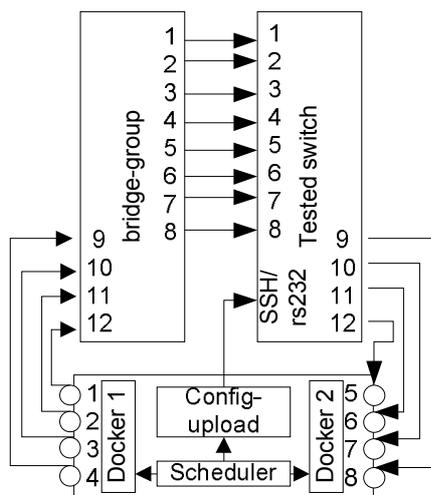
Из теории систем массового обслуживания известно, что время ожидания в очереди связано с длиной очереди соотношением

$$\bar{T}_k = \frac{\bar{L}_k}{\lambda_k}, \quad (4)$$

где \bar{L}_k – средняя длина очереди в данный временной интервал на интерфейсе k ; λ_k – интенсивность поступления новых пакетов на интерфейс k , $\lambda_k = 1 / \tau_k$ для экспоненциального закона распределения интервалов времени между пакетами τ_k .

Для аппаратных коммутаторов $\overline{T}_k = t_{process}$ для порта k , поскольку пакет находится во входящей очереди до момента коммутации. Для задания параметров модели, адекватной реальному коммутатору в плане задержек по обработке пакетов до коммутации, необходимо создать модуль очереди с обрабатывающим устройством, вносящим задержки в соответствии с функцией задержки реального коммутатора. В общем случае для этого требуется распределение (3).

Для снятия показаний задержки во входящей очереди реального коммутатора достаточно создать план экспериментальных исследований, постепенно увеличивающий количество пакетов на одном интерфейсе и общее количество задействованных интерфейсов на коммутаторе. Для этого удобнее всего использовать второй коммутатор в режиме моста (для Cisco это включение всех портов в *bridge-group* с установленным *protocol ieee*), соединённый всеми портами 1:1 с исследуемым коммутатором, а также Linux компьютер с несколькими сетевыми картами с аппаратной обработкой трафика (для снижения использования процессора при обработке трафика).



На рис. 2 показан пример схемы снятия данных о производительности и задержке передачи коммутатора. Трафик генерируется в контейнере 1, принимается в контейнере 2, дампы трафика записываются с временными метками точностью до микросекунд. Планировщик запускает различные схемы распространения трафика через включение новых портов (через прямое управление коммутатором), варьирует интенсивность, запрашивает данные о состоянии очередей, потерянных пакетов, загрузки памяти, процессора, прерываний, срабатывания кэша. Крестиками показаны временно отключенные каналы. Эта схема позволяет провести полное исследование всех аспектов работы коммутатора.

Рис. 2. Схема стендового съема данных для модели
Fig. 2. Scheme of bench data acquisition for the model

План эксперимента должен включать различные сочетания как паттернов трафика, так и количества задействованных портов на вход и выход. Несколько выходящих портов и, соответственно, адресов назначения пакетов используются для минимизации воздействия выходящей очереди.

Простейший план эксперимента включает в себя генерацию трафика по экспоненциальному закону распределения времени между пакетами, с постепенным увеличением интенсивности и количества задействованных портов.

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{1k} \\ \lambda_{21} & \dots & \dots \\ \lambda_{m1} & \dots & \lambda_{mk} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где k – количество интерфейсов для тестирования; m – количество планов эксперимента.

$$\lambda_{i,j} = h(i,j) \cdot \lambda_{i,j-1}, i \in (1,k], j \in (2,m], \quad (6)$$

где функция $h(i,j) = (i \cdot m + j) \cdot 2^{2R}$ предоставляет прогрессивный коэффициент для показательного увеличения трафика, коэффициент R используется для выбора такого шага, чтобы

$$R: \lambda_{m,k} \leq \sum_{i=1}^k \mu_i, \text{ где } \mu_i - \text{производительность обслуживания } i\text{-го интерфейса.}$$

Каждый элемент матрицы Λ используется для генерации трафика интенсивностью $\lambda_{i,j}$ при количестве задействованных входных интерфейсов, равном j . Результаты записываются в выходные матрицы D (средняя полная задержка передачи), Q_i (средний размер входящей очереди), Q_o (средний размер исходящей очереди – только если используется один исходящий в генератор трафика порт), L (количество потерянных пакетов).

Если уже существующая матрица результатов эксперимента слишком подробная для использования в модели, ее аппроксимируют матрицей меньшего ранга любым выбранным методом, например методом наименьших квадратов или сплайнами.

2. Использование полученных данных в модели коммутатора

Рассмотрим базовую модель коммутатора, представленного в фреймворке INET Omnet++. Коммутатор представлен набором модулей, взаимодействующих через систему передачи сообщений Omnet [13]. Наиболее подробно реализованы модули интерфейсов Ethernet, в частности имеются реализации входящей очереди типа Tail-Drop, исходящих очередей типов FIFO, RED, WRED, PQ, CBFQ, также возможна реализация задержки передачи на линии. Однако в этой базовой модели отсутствует реализация или имитация процессов внутренней обработки пакетов, вся коммутация представлена модулем MacAddressTable с поиском адресов, модулем MacRelayUnit, просто передающим пакеты на исходящий интерфейс без задержек. Более подробная реализация коммутатора от фреймворка ANSA Omnet++ имеет множество протоколов L3-L4 в составе коммутатора, реализации OpenFlow-коммутатора наиболее полно описывают процесс работы, но только в режиме Openflow, а не в обычном режиме коммутации [14]. При этом в Openflow режиме существует возможность генерации реальных запросов к настоящему внешнему контроллеру и интерпретации ответов. Моделирование всех внутренних процессов обработки пакета в общем случае не требуется, поскольку изучаются поведение задержки, очередей, потери пакетов и приоритизации. Для целей получения адекватной модели на уровне первых моментов распределения времени между пакетами достаточно симулировать поведение функции обработки по задержке с теми же первыми моментами распределений.

Рассмотрим создание блока функции задержки обработки на примере выходной матрицы средней длины входящих очередей Q_i , имеющей ту же размерность, что и Λ , т. е. каждому значению $\lambda_{i,j}$ однозначно соответствует значение $q_{i,j}$. Для того чтобы определить среднее значение очереди $F(\lambda_0, j)$ для произвольного λ_0 при заданном количестве интерфейсов j , необходимо найти такое значение i , при котором $\lambda_{i,j} \leq \lambda_0 < \lambda_{i+1,j}$.

Тогда в случае использования линейной интерполяции отрезков между узлами, образованными столбцом j матрицы Λ , значение длины очереди для матрицы результатов (например, матрицы Q_i) вычисляется по формуле

$$F(\lambda_0, j) = q_{i,j} + u \cdot (q_{i+1,j} - q_{i,j}), \quad (7)$$

где коэффициент $u = \frac{\lambda_0 - \lambda_{i,j}}{\lambda_{i+1,j} - \lambda_{i,j}}$.

Как правило, функции зависимости задержки от интенсивности поступления пакетов имеют вид степенных функций, погрешность кусочно-линейной интерполяции по сравнению с использованием более высоких порядков интерполяции зависит от числа строк матрицы Λ и шага изменения параметров. Она может быть сравнима с погрешностью экспериментальных измерений при коротком шаге и вносить существенные изменения в функционирование сети на длинных шагах. Для шага между измерениями более 50 пакетов лучше использовать интерполяцию более высокими степенями.

3. Постановка эксперимента

Схема для снятия показаний выполнена по схеме рис. 2. В качестве коммутатора для распределения использовался Cisco 3750x, в качестве исследуемого коммутатора – HP 3500yl-24. Станция тестирования – Ubuntu 18.04 на базе Xeon E5 с 4 встроенными сетевыми картами 10Гб/с с поддержкой аппаратной обработки пакетов.

Спецификация изучаемого коммутатора содержит сведения о наличии 3000 записей в TCAM-таблице для различных правил, включая классификацию, ACL. Кроме этого, утверждает одновременная коммутация на скорости линии через все порты. Но при включении Openflow-режима все может измениться даже при реактивном способе задания правил. Первую часть эксперимента проведем с загрузкой портов 1–20 трафиком 64 байта (как наиболее ресурсозатратного). Максимальный теоретический максимум передачи с учетом преамбулы и интервала между фреймами составляет 1,488 млн фреймов/с с полезным использованием полосы пропускания 761 Мбит/с. 20 портов теоретически могут передать 28,960 млн фреймов/с. В табл. 1 показан прогрессивный план эксперимента (матрица Λ).

План эксперимента – матрица Λ , в тыс. пакетов/с

Table 1

Experiment plan – matrix Λ , thousands of packets per second

№	Кол-во задействованных портов					
	1	2	5	10	15	20
1	2	5	38	313	1352	4145
2	38	62	219	1043	3380	8679
3	219	313	793	2731	7291	16464
4	793	1043	2185	6084	14139	28959

Трафик UDP будет генерироваться утилитой *mgen* по сгенерированному скрипту посылки пакетов с требуемым законом распределения. Съём посланного и принятого трафика осуществляется утилитой *tcpdump* с записью на *tmpfs*-диск и опцией записи временных меток с микросекундами. Каждый пакет имеет в полезной нагрузке порядковый номер в ASCII, что позволит отследить его задержку простыми утилитами сравнения *linux*.

4. Эксперимент

Тестирование проводилось на стенде, состоящем из 2 коммутаторов и одного сервера (см. рис. 2). В качестве коммутатора для распределения использовался Cisco 3750x, в качестве исследуемого коммутатора – HP 3500yl-24. Станция тестирования – Ubuntu 18.04 на базе Xeon E5/32Гб JPE/4NVe SSD RAIN 10, материнская плата Supermicro с 4 сетевыми картами 10Гб/с на базе модуля AOC-STG-b4S с поддержкой аппаратной обработки пакетов.

Для автоматизации анализа параметров коммутатора создан скрипт, который по плану эксперимента генерирует трафик на требуемое количество портов с требуемыми параметрами распределения, собирает дампы трафика (использовалось ограничение – записывались только заголовки и время фрейма). Каждый пакет посылается на следующий по порядку порт UDP, для того чтобы быстро найти этот пакет на приемной стороне в случае разного порядка получения. Запись происходит на файловую систему TMPFS с заранее выделенным участком памяти для снижения времени выделения новой памяти, включенной опцией «*noatime*» с высокой скоростью записи и почти нулевым временем поиска. После каждого прогона из записи дампов извлекалось время и номер UDP порта по каждому интерфейсу, затем рассчитывались разности времени в микросекундах. Потом файлы записи трафика очищались для освобождения места для нового прогона.

При тестировании выяснилось, что имеющаяся материнская плата имеет ограничение в 40 Гбит/с на всю шину с сетевыми картами, поэтому максимальная полоса пропускания на выходе из двух сетевых карт составила не более 23,5 Гбит/с с учетом накладных расходов.

Для измерения задержки на сетевом интерфейсе проведен эксперимент с соединением напрямую входов и выходов 10 Гбит/с (табл. 2, 3).

Таблица 2
Прямое соединение сетевых карт
Table 2
Direct network card connection

Параметр	Задержка пакетов		
Размер пакета	64	512	1518
Задержка, мкс	2,04	2,19	2,21

Таблица 3
Задержки в служебном коммутаторе Cisco 3750x
Table 3
Latency of intermediate switch Cisco 3750x

Параметр	Задержка пакетов		
Размер пакета	64	512	1518
Задержка на передаче 10→10 Гбит/с, мкс	4,27	4,89	5,96
Задержка на передаче 10→1 Гбит/с, мкс	7,21	12,1	18,41

Анализ трафика проводился средствами языка R, имеющего широкий выбор библиотек статистического анализа. На рис. 3 показано распределение задержки прохождения пакета в коммутаторе при максимальной нагрузке 28960 пакетов/с размером 64 байт.

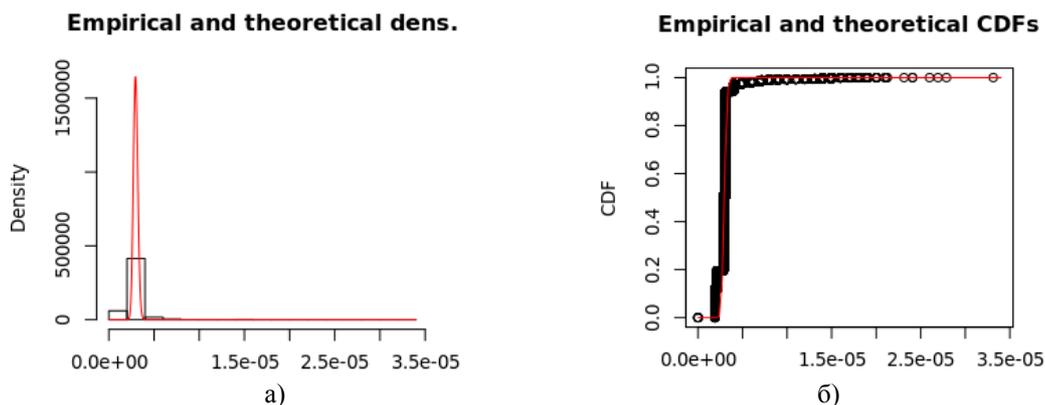


Рис. 3. Гистограмма (а) и функция распределения (б) бета-распределения (линия) и выборки времени задержки на всем диапазоне данных
 Fig. 3. Histogram (a) and distribution function (b) beta distribution (line) and sampling for full-range latency

Длинный хвост распределения образуется из-за попадания отдельных пакетов в исходящую очередь и, соответственно, существенно большего времени ожидания посылки. При увеличении детализации в диапазоне $[0; 10^{-5}]$ видны явные неоднородности (ступени), хотя объем выборки более 1 млн (рис. 4). Эти задержки соответствуют работе систем кэширования и аппаратных очередей.

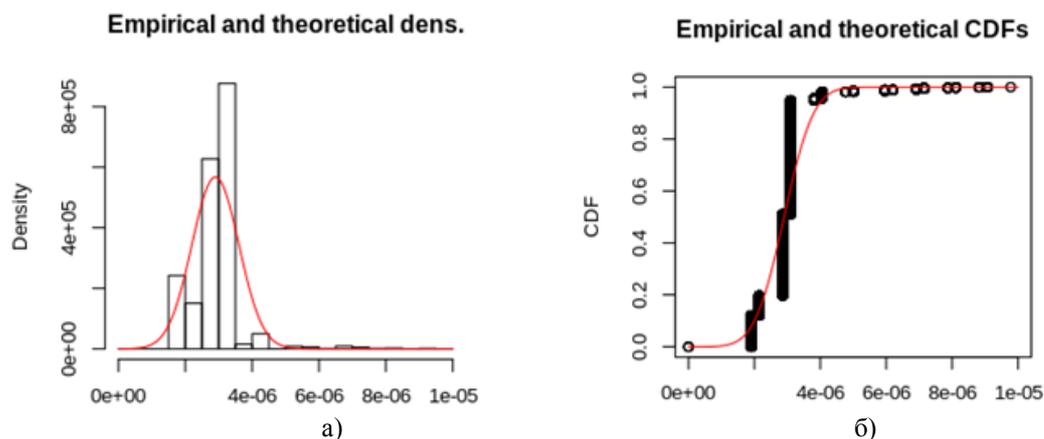


Рис. 4. Гистограмма (а) и функция распределения (б) нормального распределения (линия) и выборки времени задержки в диапазоне до $1e-5$
 Fig. 4. Histogram (a) and distribution function (b) of the normal distribution (line) and sampling latency for range up to $1e-5$

Затем прогон эксперимента по плану (см. табл. 1) показал следующие значения (табл. 4).

Таблица 4
 Задержки в исследуемом коммутаторе HP 3500yl в обычном режиме, мкс
 Table 4
 Latency in the test switch HP 3500yl in legacy mode, μ s

№	Кол-во задействованных портов					
	1	2	5	10	15	20
1	6,91	6,91	6,94	7,19	7,40	7,55
2	6,94	7,05	7,08	7,33	7,55	7,70
3	6,98	7,19	7,22	7,48	7,70	7,86
4	7,01	7,33	7,36	7,63	7,85	8,51

Средняя длина входящей очереди во всех экспериментах, кроме последнего (20 портов, 28959 тыс. пакетов/с, очередь – 3 пакета), составила 1 пакет. В табл. 5 показаны результаты эксперимента по 4-й строке матрицы Λ для Openflow в реактивном режиме с разрешением 0,5 мкс. По графику поведения задержки (рис. 5) видны определенные (практически дискретные), наиболее часто встречающиеся уровни задержки – около 4, 5, 10, 11 мкс. Значения выше 10 мкс – ожидания в выходной очереди.

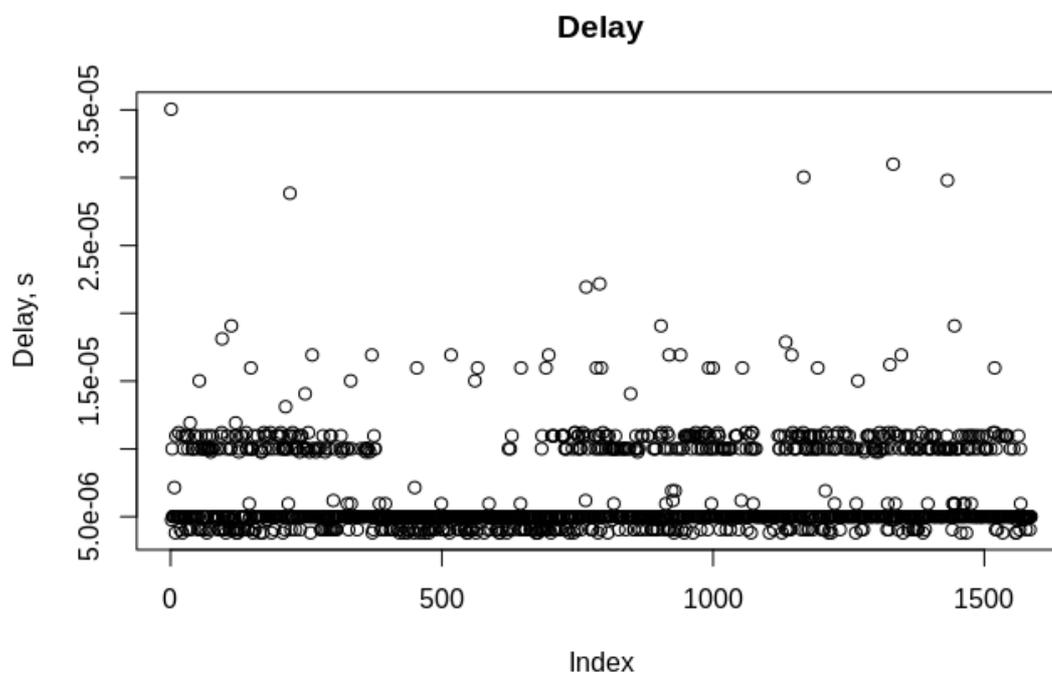


Рис. 5. График задержки внутри коммутатора
Fig. 5. Latency graph for the switch

Таблица 5
Задержки в исследуемом коммутаторе HP 3500yl в Openflow-режиме, мкс
Table 5
Latency in the test switch HP 3500yl in the Openflow mode, μ s

№	Кол-во задействованных портов					
	1	2	5	10	15	20
4	271,3	284,9	293,4	299,3	305,3	308,3

Как видим, оптимизация работы с Openflow на этом коммутаторе отсутствует, и латентность поиска в таблице повышается в несколько раз.

Для сравнения данных модель коммутатора OMNET тестировалась на 4-й строке плана эксперимента. Было задействовано столько генераторов экспоненциального трафика, сколько портов требовалось в плане эксперимента. Статистика средней задержки рассчитывалась по дампам событий пакетов, сохраненных в скалярный файл. Результаты показаны в табл. 6.

Таблица 6
Задержки в модельном коммутаторе в обычном режиме, мкс
Table 6
Latency in the model switch in legacy mode, μ s

№	Кол-во задействованных портов					
	1	2	5	10	15	20
4	7,00	7,15	7,25	7,38	7,5	8,25

Средний размер очереди при $k = 20$ составил 3 пакета, данные модели согласуются с данными эксперимента в пределах 5 %.

Для оценки различий между выборкой с экспериментальными данными о задержке и выборкой, полученной в эксперименте с моделью по каждой позиции плана эксперимента, использовался статистический U-критерий Манна–Уитни как менее подверженный влиянию вида статистического распределения. Для уровня значимости 0,05 значение U-критерия по каждой позиции превысило критическое, а это означает, что модель адекватно описывает реальный коммутатор по критерию задержки, возникающей при обработке пакетов.

Заключение

Рассмотренный подход позволяет быстро получать модели, статистически совпадающие по поведению выбранных параметров с реальным измеренным оборудованием на существующих открытых системах моделирования. Данный подход будет развиваться в дальнейшем в сторону более детального описания внутренних процессов и их статистического описания на основе экспериментальных данных.

Рассмотрена структура моделей Omnet++, предложены методы модификации моделей для повышения уровня адекватности внутренней обработки пакетов.

Полученные результаты при уровне значимости 0,05 подтвердили работоспособность данного подхода при создании моделей, более точно описывающих временные характеристики процессов обработки трафика в сетевом оборудовании.

Разработанная методика исследования оборудования позволяет быстро исследовать статистические параметры производительности и будет развиваться дальше в сторону получения данных без отключения от сети.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-01065, а также гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (НШ-2502.2020.9).

Литература

1. *Network function virtualization enablement within SDN data plane* / H. Mekky, F. Hao, S. Mukherjee et al. // *IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications*. – IEEE, 2017. – P. 1–9.
2. Кутузов, О.И. К анализу парадигм имитационного моделирования / О.И. Кутузов, Т.М. Татарникова // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2017. – № 3
3. Акатов, Д.В. Характеристики основных средств для анализа и оптимизации корпоративных сетей / Д.В. Акатов, А.Г. Юрочкин // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. – 2015. – № 2. – С. 8.
4. *Model-Based Performance Predictions for SDN-Based Networks: A Case Study* / S. Herrleben, P. Rygielski, J. Grohmann et al. // *International Conference on Measurement, Modelling and Evaluation of Computing Systems*. – Springer, Cham, 2020. – P. 82–98.
5. Мусеев, В.И. Детектирование дисциплины обслуживания очередей в Ethernet-коммутаторах / В.И. Мусеев // *Математика и междисциплинарные исследования* 2018. – 2018. – С. 189–192.
6. Хабаров, С.П. Моделирование Ethernet сетей в среде OMNeT++ INET framework // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики* / С.П. Хабаров. – 2018. – Т. 18. – № 3. – С. 462–472.
7. Nayyar, A.A *Comprehensive Review of Simulation Tools for Wireless Sensor Networks (WSNs)* / A. Nayyar, R. Singh // *Journal of Wireless Networking and Communications*. – 2015. – V. 5(1).
8. Темлюков, Д.А. Моделирование времени доставки пакетов данных с учетом очередей / Д.А. Темлюков, А.М. Андреев // *Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки*. – 2018. – С. 124.

9. *PacketScope: Monitoring the Packet Lifecycle Inside a Switch* / R. Teixeira, R. Harrison, A. Gupta, J. Rexford // *Proceedings of the Symposium on SDN Research*. – 2020. – P. 76–82.

10. Моисеев, В.И. Экспериментальное исследование структуры пакетного буфера Ethernet коммутатора / В.И. Моисеев // *Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт*. – 2020. – Т. 14. – № 1. – С. 18–24.

11. Модель функционирования телекоммуникационного оборудования программно-конфигурируемых сетей / К.Е. Самуйлов, И.А. Шалимов, И.Г. Бужин, Ю.Б. Миронов // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. – 2018. – Т. 14. – № 1.

12. Ларкин, Е.В. О приближении потока событий к пуассоновскому / Е.В. Ларкин, Д.В. Горбачев, А.Н. Привалов // *Чебышевский сборник*. – 2017. – № 18(2). – С. 222–234.

13. *An extension of the OMNeT++ INET framework for simulating real-time ethernet with high accuracy* / T. Steinbach, H.D. Kenfack, F. Korf, T.C. Schmidt // *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*. – 2011. – P. 375–382.

14. Veselý, V. Multicast simulation and modeling in OMNeT++ / V. Veselý, P. Matousek, M. Svěda // *SimuTools*. – 2013. – P. 142–145

Болодурина Ирина Павловна, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; prmat@mail.osu.ru.

Ушаков Юрий Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры геометрии и компьютерных наук, Оренбургский государственный университет; unpk@mail.ru.

Ушакова Маргарита Викторовна, старший преподаватель кафедры геометрии и компьютерных наук, Оренбургский государственный университет; m.v.ushakova@mail.ru.

Поступила в редакцию 7 марта 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr200301

METHOD OF OBTAINING GENERALIZED STATISTICAL CHARACTERISTICS OF NETWORK EQUIPMENT FOR CREATION OF SIMULATION MODELS

I.P. Bolodurina, prmat@mail.osu.ru,

Yu.A. Ushakov, unpk@mail.ru,

M.V. Ushakova, m.v.ushakova@mail.ru

Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

The research is devoted to the problem of the development models of network equipment that precisely reproduce the operation of real equipment by the time characteristics.

Aim. This research is aimed at developing a methodology that allows you to quickly obtain models that statistically coincide in the behavior of the selected parameters with real measured equipment on existing open modeling systems.

Methods. To obtain the performance parameters and time characteristics of the real equipment, an approach was proposed, which includes experiment planning to compute the characteristics for a wide range of input traffic intensities. In addition, the approach describes the connection scheme and equipment configuration including external switch control to test the effect of various settings on the performance and packet processing times. It also includes the scripts to automate the creation of traf-

fic test sets with the required parameters of time distribution between the packets as well as the scheme of connection through the container services and receiving traffic dumps. The approach does not include the testing of the output queues operation because the goal was to investigate and transfer into the model processes, which occur before the frames are placed in the outgoing interface queues. An open-source Omnet++ software was used as a modeling environment.

Results. We studied the structure of its existing switch model and identified disadvantages that affect the accuracy and reliability of the results. In addition, we proposed an approach for implementing model delay lines based on the interpolation of time parameter tables obtained from real data for the required combination of traffic parameters and inbound interfaces. To test the developed approaches, a test bench on real equipment was assembled, and an experimental research plan was developed. Finally, an automated testing script was implemented according to a given plan. Testing was carried out in the conventional frame switching mode as well as in the switching mode based on OpenFlow tables. In addition, the time characteristics of the intermediate equipment were also obtained in order to take into account their influence on the experimental results. Based on them, a table of parameters was computed for the processing delay line in the model, and the experiment was conducted on the model in Omnet++. Since the obtained samples in the statistical analysis showed the types of distributions that are different from the 3 normal and exponential, the statistical Mann–Whitney U-test was used to compare the mean values.

Conclusion. The results obtained at a significance level of 0.05 confirmed the efficiency of this approach for models that more accurately describe the temporal characteristics of the traffic processing in network equipment.

Keywords: modeling, simulation model, switching, delays.

References

1. Mekky H., Hao F., Mukherjee S., Lakshman T.V., Zhang Z. Network Function Virtualization Enablement within SDN Data Plane. *IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications*, 2017, pp. 1–9.
2. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. [On the Simulation Paradigm Analysis]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 552–558. (in Russ.)
3. Akatov D.V., Yurochkin A.G. [The Characteristics of the Main Tools for Analysis and Optimization of Enterprise Networks]. *Modeling, Optimization and Information Technology*, 2015, no. 2, pp. 8–8. (in Russ.)
4. Herrleben S., Rygielski P., Grohmann J., Eismann S., Hobfeld T., Kounev S. Model-Based Performance Predictions for SDN-Based Networks: A Case Study. *International Conference on Measurement, Modelling and Evaluation of Computing Systems*, 2020, pp. 82–98.
5. Moiseev V.I. [Detecting Ethernet Switch Buffer Scheduling Discipline]. *Mathematics and Interdisciplinary Studies-2018*, 2018, pp. 189–192. (in Russ.)
6. Khabarov S.P. [Modeling of Ethernet Networks in OMNeT ++ INET Framework Medium]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 462–472 (in Russ.)
7. Nayyar A.A., Singh R. Comprehensive Review of Simulation Tools for Wireless Sensor Networks (WSNs). *Journal of Wireless Networking and Communications*, 2015, vol. 5(1), pp. 19–47.
8. Temlukov D.A., Andreev A.M. [Queuing Simulation of Data Packet Delivery Time]. *The scientific community of students of the XXI century. Technical science*, 2018, pp. 124–124 (in Russ.)
9. Teixeira R., Harrison R., Gupta A., Rexford J. PacketScope: Monitoring the Packet Lifecycle Inside a Switch. *Proceedings of the Symposium on SDN Research*, 2020, pp. 76–82.
10. Moiseev V.I. [Experimental Evaluation of Ethernet Switch Packet Buffer Structures]. *T-Comm*, 2020, vol. 14, no. 1, pp.18–24. (in Russ.)
11. Samouylov K.E., Shalimov I.A., Buzhin I.G., Mironov Yu.B. [Model of Functioning of Telecommunication Equipment for Software-Configured Networks]. *Modern Information Technologies and IT-Education*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 13–26. (in Russ.)
12. Larkin E.V., Gorbachev D.V., Privalov A.N. [On the Approximation of the Flow of Events for a Poisson]. *Chebyshevskii Sbornik*, 2017, vol. 18(2), pp. 222–234. (in Russ.)

13. Steinbach T., Kenfack H.D., Korf F., Schmidt T.C. An Extension of the OMNeT++ INET Framework for Simulating Real-Time Ethernet with High Accuracy. *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, 2011, pp. 375–382.

14. Veselý V., Matousek P., Svěda M. Multicast Simulation and Modeling in OMNeT++. *SimuTools*, 2013, pp. 142–145.

Received 7 March 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Болодурина, И.П. Методика получения обобщенных статистических характеристик сетевого оборудования для создания имитационных моделей / И.П. Болодурина, Ю.А. Ушаков, М.В. Ушакова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 5–17. DOI: 10.14529/ctcr200301

FOR CITATION

Bolodurina I.P., Ushakov Yu.A., Ushakova M.V., Method of Obtaining Generalized Statistical Characteristics of Network Equipment for Creation of Simulation Models. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 5–17. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200301

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ПРОГРЕССИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ПРИ НАСТРОЙКЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПИ-ТИПА

А.В. Копотева

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
филиал в г. Березники, г. Березники, Россия*

Введение. В статье рассматривается возможность использования геометрической прогрессии для подбора настроек нечетких логических регуляторов. Треугольные и трапециевидные функции принадлежности достаточно часто используются для описания параметров нечетких регуляторов, а настройка регулятора сводится к подбору оснований таких функций. Обзор публикационной активности по данной тематике показал, что не существует универсального метода настройки нечетких регуляторов, а те, что существуют, весьма сложны и недостаточно подробно описаны, чтобы их можно было легко повторить.

Цель исследования. Мы предположили, что основания функций принадлежности термов параметров нечетких регуляторов могут быть описаны некоторой числовой прогрессией, в частности, геометрической, что позволит свести процедуру настройки регулятора к подбору единственного параметра – знаменателя прогрессии.

Материалы и методы. В предположении, что первый член прогрессии равен единице, был выполнен расчет ее второго и третьего членов с различными знаменателями в интервале от 1,5 до 3,5 с шагом 0,2, которые были приняты за основания функций принадлежности термов условной лингвистической переменной. В FIS-редакторе MATLAB был спроектирован ПИ-подобный нечеткий регулятор с пятитермовыми параметрами. После этого на основании анализа результатов работы автоматически настроенного ПИ-регулятора для выбранного объекта управления были определены интервалы изменения входных и выходного параметров нечеткого ПИ-регулятора, на которые была спроецирована условная лингвистическая переменная. В результате были получены одиннадцать различных настроек, которые были использованы для управления технологическим объектом с запаздыванием.

Результаты. Семь из полученных нечетких регуляторов оказались вполне пригодными для управления выбранным объектом. Полученные на основании результирующих переходных процессов показатели качества регулирования были сопоставлены с соответствующими показателями качества управления обычного ПИ-регулятора. Было установлено, что все семь нечетких регуляторов обеспечивают гораздо лучшее качество управления по сравнению с обычным ПИ-регулятором.

Заключение. Полученные результаты позволяют утверждать, что применение геометрической прогрессии для определения параметров нечетких регуляторов является простым и эффективным способом получения их настроек удовлетворительного качества.

Ключевые слова: нечеткий логический регулятор, функция принадлежности, геометрическая прогрессия, объект управления с запаздыванием, ошибка регулирования, время регулирования, ПИ-регулятор

Введение

Управление сложными технологическими объектами на базе нечетких логических регуляторов является весьма распространенным современным направлением прикладных исследований. При этом не существует общепринятых методов их проектирования, а настройки подбираются экспериментально под каждый конкретный объект управления. Как правило, процесс настройки регулятора представляет собой сложную оптимизационную или итерационную процедуру. В частности, в [1] приводятся примеры настроенных нечетких систем для управления рядом

промышленных объектов, а также для решения задач распознавания образов и речи, однако о проектировании и настройке таких систем авторы умалчивают. Авторы [2] при обосновании преимуществ использования нечетких логических регуляторов для управления процессом стабилизации катализатора установки каталитического риформинга бензинов по сравнению с классическими ПИД-регуляторами рассматривают различные варианты функций принадлежности термов параметров регулятора, причем отсутствует как обоснование выбора диапазонов изменения параметров регулятора, так и ссылка на соответствующий источник. В [3] рассматривается гибридная система из обычного и нечеткого ПИД-регуляторов для управления электродвигателем постоянного тока, однако процедура подбора оснований функций принадлежности термов параметров нечеткой составляющей регулятора подробно не описана. В ряде работ для настройки параметров нечетких регуляторов разрабатываются достаточно сложные и трудоемкие алгоритмы различной природы. В частности, в [4] подбор параметров нечеткого регулятора для управления нестационарным процессом радиохимического производства осуществляется в рамках совокупности оптимизационной и итерационной процедур. Авторы [5] для настройки параметров нейро-нечеткого регулятора предлагают использовать генетический алгоритм. В [6] для подбора параметров нечеткого регулятора используется численный алгоритм оптимизации методом градиентного спуска. В [7] применяется метод настройки нечетких регуляторов на основании анализа результатов их работы, в [8] авторы рассматривают возможность самонастройки нейро-нечеткого регулятора, а в [9] – нечеткого ПИ-регулятора. В [10] подбор параметров нечеткого регулятора осуществляется на основании рекурсивного алгоритма Калмана, в [11] – на основании оптимизационного алгоритма «серых волков», в [12] – «роя частиц» (формы роевого интеллекта). В [13] авторы разрабатывают и применяют гибридный детерминировано-стохастический алгоритм для оптимизации параметров функций принадлежности термов.

В большинстве работ в качестве функций принадлежности термов параметра выбирается совокупность из центральных треугольных и боковых трапециевидных их видов. При этом исходные основания функций принадлежности термов нечетких переменных обычно выбираются равными, что предполагает постоянную точность регулирования на всем множестве значений входных параметров нечеткого регулятора; корректировка этих оснований и происходит в процессе настройки регулятора.

Недостатком всех рассмотренных работ помимо сложности настройки нечеткого регулятора является отсутствие результатов работы алгоритмов настройки в форме итоговых функций принадлежности термов параметров. Это не позволяет проверить работоспособность найденных настроек на других объектах управления. При этом логично предположить, что управление при малом отклонении отклика управляемого объекта Y от целевого значения Y^* (т. е. вблизи нормального режима работы объекта) должно осуществляться аккуратнее, чем при его большом значении, т. е. основания функций принадлежности отдельных термов параметра регулятора должны увеличиваться по мере удаления от его условной нормы. Конкретные значения оснований функций принадлежности в таком случае представляют собой элементы числовой последовательности, одной из возможных форм которой является геометрическая прогрессия.

В данном исследовании рассматриваются вопросы о ее использовании для настройки нечеткого ПИ-подобного логического регулятора, а также о влиянии величины знаменателя прогрессии на качество результирующего переходного процесса. Для этого в среде MATLAB Simulink синтезируется контур управления химико-технологическим объектом с запаздыванием с классическим ПИ-регулятором, на основании которого определяются диапазоны изменения входных и выходных параметров нечеткого логического регулятора ПИ-типа. Далее производится расчет длин оснований термов входных и выходных параметров нечеткого регулятора в предположении, что они образуют геометрические прогрессии с первым членом, равным 1,0, и с различными знаменателями в диапазоне от 1,5 до 3,5, которые затем проецируются на найденные ранее диапазоны изменения параметров. Полученные настройки применяются к нечеткому логическому регулятору ПИ-типа с центральными треугольными и боковыми трапециевидными функциями принадлежности термов его параметров, сконструированному средствами FIS-редактора MATLAB. Результирующие переходные процессы сравниваются между собой и с переходным процессом в случае классического ПИ-регулятора по критериям времени регулирования и максимуму абсолютной величины рассогласования.

Контуры управления на базе классического ПИ-регулятора и нечеткого логического ПИ-подобного регулятора

В качестве объекта управления рассмотрим pH раствора аммиачной селитры в аппарате нейтрализации азотной кислоты аммиаком в зависимости от положения регулирующего органа на линии аммиака в филиале «Азот» АО «ОХК «Уралхим» г. Березники Пермского края. Построенная по нормированным данным передаточная функция объекта имеет вид $W(s) \approx \frac{6}{6974 \cdot s^2 + 152 \cdot s + 1} \cdot e^{-25 \cdot s}$ [14]. Базой сравнения и источником данных для подбора параметров нечеткого регулятора служит блочный ПИ-регулятор, настроенный с помощью средства автоматической настройки MATLAB PID-tuner (рис. 1). Исследование результатов работы соответствующего контура управления позволило установить диапазоны изменения ошибки регулирования Error (от 0 до 3,034), ее интеграла по времени регулирования Error_Int (от 0 до 820,387) и управления Control (от 0 до 1,071). При этом максимум абсолютной величины рассогласования ($\max|\Delta Y(t)|$) составил 3,034, а время регулирования (t_p) – 1989,6 с. (за данный показатель мы выбрали момент времени, когда ошибка регулирования становится стабильно меньше 10^{-4}).

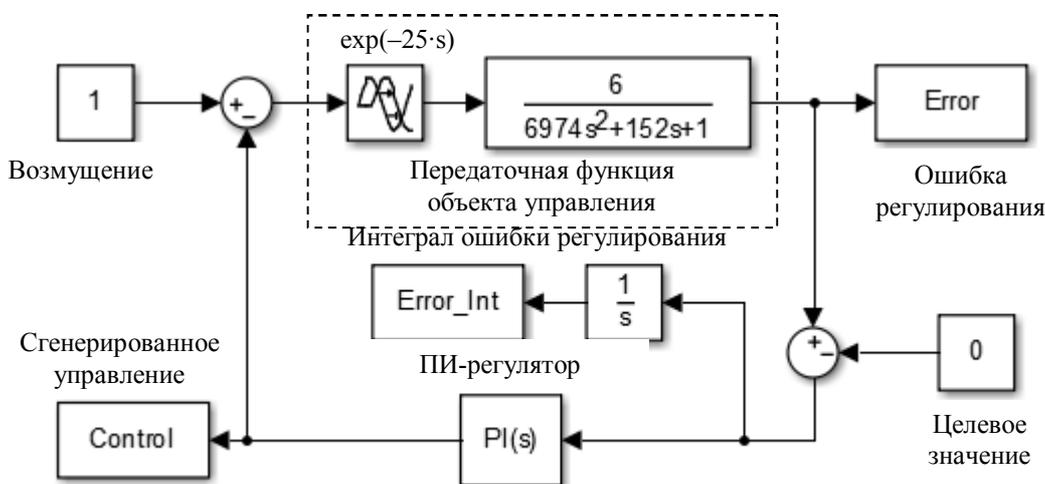


Рис. 1. Контур управления с ПИ-регулятором
Fig. 1. Control loop with PI controller

ПИ-подобный нечеткий логический регулятор для соответствующего контура управления (рис. 2) сконструируем в FIS-редакторе MATLAB, исходя из следующих соображений.

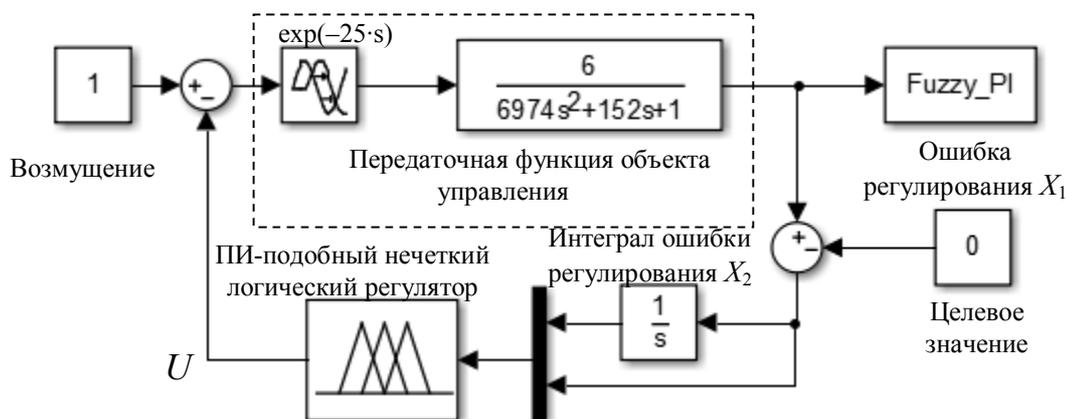


Рис. 2. Контур управления с нечетким ПИ-подобным регулятором
Fig. 2. Control loop with fuzzy PI controller

1. Входные (X_1 и X_2) и выходной (U) параметры регулятора описываются лингвистическими переменными, содержащими пять термов и определяемыми как $L^5 = \{l^5 = \text{«большое отрицатель-»}$

ное» (БО), l^{52} = «малое отрицательное» (МО), l^{53} = «нулевое» (Н), l^{54} = «малое положительное» (МП), l^{55} = «большое положительное» (БП)}.

2. Функции принадлежности термов «малое отрицательное» $\mu_{52}(x)$, «нулевое» $\mu_{53}(x)$ и «малое положительное» $\mu_{54}(x)$ являются треугольными, а термов «большое отрицательное» $\mu_{51}(x)$ и «большое положительное» $\mu_{55}(x)$ – трапециевидными [15]. Треугольные функции принадлежности имеют по три параметра: левый и правый минимумы ($lmin_{5i}$ и $rmin_{5i}$) такие, что $\mu_{5i}(lmin_{5i}) = \mu_{5i}(rmin_{5i}) = 0$, и пиковое значение $peak_{5i}$ такое, что $\mu_{5i}(peak_{5i}) = 1$, $i = 2,3,4$, причем пик нулевого значения симметричен относительно его минимумов, т. е. $peak_{53} = (lmin_{53} + rmin_{53})/2$. Трапециевидные функции принадлежности имеют по 4 параметра: левый и правый минимумы ($lmin_{5i}$ и $rmin_{5i}$) такие, что $\mu_{5i}(lmin_{5i}) = \mu_{5i}(rmin_{5i}) = 0$, и левое и правое пиковые значения $lpeak_{5i}$ и $rpeak_{5i}$ такие, что $\mu_{5i}(lpeak_{5i}) = \mu_{5i}(rpeak_{5i}) = 1$, $i = 1,5$. При этом пик функции принадлежности каждого терма совпадает с минимумами соседних термов (рис. 3), а длины их оснований являются элементами геометрической прогрессии со знаменателем $q > 1$.

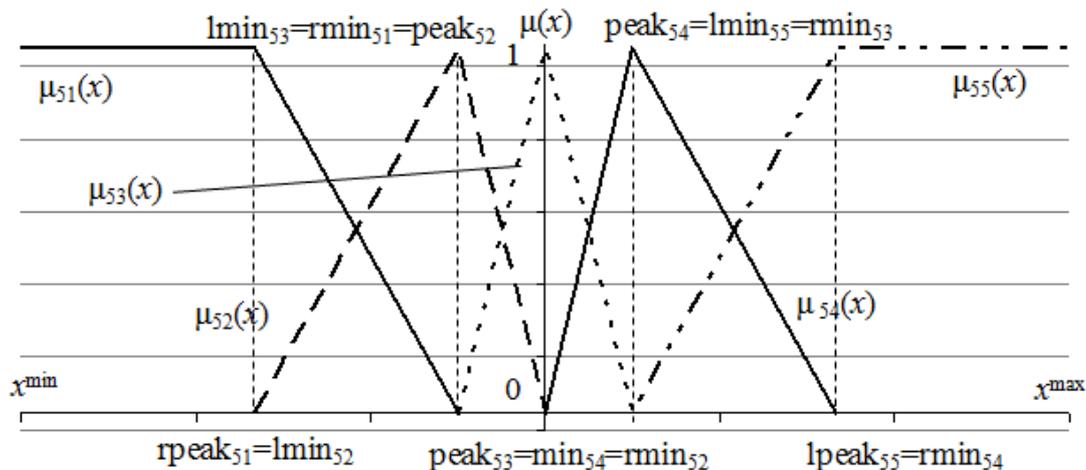


Рис. 3. Лингвистическая переменная с пятью термами
Fig. 3. Linguistic variable with five terms

3. Регулятор является однокомпонентным, т. е. функционирует на основании единой базы правил «если – то», состоящей из 25 правил, определяемой в соответствии с табл. 1.

4. В качестве начального интервала для входного П-параметра НЛР выбирается симметричный относительно нуля интервал вида $[-\max_t |\text{Error}|; +\max_t |\text{Error}|] = [-3,034; 3,034]$.

Матрица знаний для ПИ-подобного нечеткого регулятора

Таблица 1

Table 1

Knowledge matrix for a PI fuzzy controller

	l_{X2}^{51} = БО	l_{X2}^{52} = МО	l_{X2}^{53} = Н	l_{X2}^{54} = МП	l_{X2}^{55} = БП
l_{X1}^{51} = БО	$U = \text{БО}$	$U = \text{БО}$	$U = \text{БО}$	$U = \text{МО}$	$U = \text{Н}$
l_{X1}^{52} = МО	$U = \text{БО}$	$U = \text{БО}$	$U = \text{МО}$	$U = \text{Н}$	$U = \text{МП}$
l_{X1}^{53} = Н	$U = \text{БО}$	$U = \text{МО}$	$U = \text{Н}$	$U = \text{МП}$	$U = \text{БП}$
l_{X1}^{54} = МП	$U = \text{МО}$	$U = \text{Н}$	$U = \text{МП}$	$U = \text{БП}$	$U = \text{БП}$
l_{X1}^{55} = БП	$U = \text{Н}$	$U = \text{МП}$	$U = \text{БП}$	$U = \text{БП}$	$U = \text{БП}$

5. В качестве начального интервала для входного И-параметра НЛР выбирается симметричный относительно нуля интервал вида $[-\max_t |\text{Error_Int}|; +\max_t |\text{Error_Int}|] = [-820,387; 820,387]$.

Управление в технических системах

6. В качестве начального интервала для выходного параметра НЛР выбирается симметричный относительно величины входного возмущения (единицы) интервал вида $[2 - \max_i |\text{Controller_output}|; \max_i |\text{Controller_output}|] = [0,929; 1,071]$.

Расчет параметров функций принадлежности термов входов и выходов нечеткого регулятора

Предположим, что основания функций принадлежности термов l^{53} , l^{52} и l^{54} , l^{51} и l^{55} лингвистической переменной L^5 образуют геометрическую прогрессию с начальным элементом $a_0 = 1$ и знаменателем $q > 1$. Это означает, что основание функции принадлежности $\mu_{53}(x)$ равно $a_0 = 1$, основания функций принадлежности $\mu_{52}(x)$ и $\mu_{54}(x)$ составляют по $a_1 = a_0 \cdot q = 1 \cdot q = q$, а основания функций принадлежности $\mu_{51}(x)$ и $\mu_{55}(x)$ составляют по $a_2 = a_0 \cdot q^2 = 1 \cdot q^2 = q^2$. Результаты расчетов их значений для различных уровней q представлены в табл. 2.

Длины оснований функций принадлежности термов L^5

Таблица 2

The lengths of the bases of the membership functions of the terms L^5

Table 2

Термы	q										
	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5
l^{53}	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
l^{52}, l^{54}	1,50	1,70	1,90	2,10	2,30	2,50	2,70	2,90	3,10	3,30	3,50
l^{51}, l^{55}	2,25	2,89	3,61	4,41	5,29	6,25	7,29	8,41	9,61	10,89	12,25

Ранее мы условились, что пик функции принадлежности каждого термина совпадает с минимумами соседних термов. Тогда в предположении, что пик значения $l^{53} = \text{«нулевое»}$ peak_{53} равняется нулю, можно рассчитать параметры функций принадлежности остальных термов (табл. 3).

Параметры функций принадлежности термов L^5

Таблица 3

The parameters of the membership functions of the terms L^5

Table 3

Термы	Параметры	$q = 1,5$	$q = 1,9$	$q = 2,3$	$q = 2,7$	$q = 3,1$	$q = 3,5$
l^{51}	$lmin_{51}$	-2,75	-4,11	-5,79	-7,79	-10,11	-12,75
	$lpeak_{51}$	-2,75	-4,11	-5,79	-7,79	-10,11	-12,75
	$rpeak_{51}$	-1,5	-1,9	-2,3	-2,7	-3,1	-3,5
	$rlmin_{51}$	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
l^{52}	$lmin_{52}$	-1,5	-1,9	-2,3	-2,7	-3,1	-3,5
	$peak_{52}$	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
	$rmin_{52}$	0	0	0	0	0	0
l^{53}	$lmin_{53}$	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
	$peak_{53}$	0	0	0	0	0	0
	$rmin_{53}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
l^{54}	$lmin_{54}$	0	0	0	0	0	0
	$peak_{54}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	$rmin_{54}$	1,5	1,9	2,3	2,7	3,1	3,5
l^{55}	$lmin_{55}$	0,5	0,5	0,5	2,7	0,5	0,5
	$lpeak_{55}$	1,5	1,9	2,3	7,79	2,7	3,5
	$rpeak_{55}$	2,75	4,11	5,79	7,79	10,11	12,75
	$rmin_{55}$	2,75	4,11	5,79	7,79	10,11	12,75

Данные табл. 3 являются вспомогательными. Будем считать для определенности, что основания функций принадлежности термов обоих входных и выходного параметра нечеткого ПИ-регулятора определяются геометрической прогрессией с одним и тем же знаменателем. Тогда для получения конкретных параметров функций принадлежности термов X_1 и X_2 данные табл. 3 достаточно масштабировать на коэффициент отношения длин фактического интервала соответствующего входного параметра (или его половины) и его расчетного эквивалента. Например, при $q = 1,9$ расчетный интервал составляет $[-4,11; 4,11]$, т. е. имеет длину $4,11 \cdot 2 = 8,22$. Для входных параметров нечеткого регулятора X_1 и X_2 фактические интервалы определены выше как $[-3,034; 3,034]$ и $[-820,387; 820,387]$, т. е. их длина составляет $3,034 \cdot 2 = 6,068$ и $820,387 \cdot 2 = 1\,640,774$ соответственно. Для выходного параметра U фактический интервал определен как $[0,929; 1,071]$, т. е. его длина составляет $0,142$. Тогда для определения параметров функций принадлежности X_1 при $q = 1,9$ необходимо данные соответствующего столбца табл. 3 умножить на коэффициент $\lambda_{1,9}^1 = 6,068/8,22 = 3,387/4,11 \approx 0,74$, а для X_2 – на коэффициент $\lambda_{1,9}^2 = 1\,640,774/8,22 = 820,387/4,11 \approx 199,61$ (табл. 4). Для расчета конкретных параметров функций принадлежности термов U данные столбца табл. 3 необходимо масштабировать на коэффициент $\mu_{1,9} = (1,071 - 0,929)/4,11 \approx 0,035$ и сдвинуть на 1 вправо.

Данные табл. 3 и их аналоги при прочих значениях знаменателя q позволяют настроить 11 ПИ-подобных нечетких логических регуляторов Fuzzy PI 1,5, Fuzzy PI 1,7, Fuzzy PI 1,9, Fuzzy PI 2,1, Fuzzy PI 2,5, Fuzzy PI 2,7, Fuzzy PI 2,9, Fuzzy PI 3,1, Fuzzy PI 3,3 и Fuzzy PI 3,5.

Фактические параметры термов X_1 , X_2 и U при $q = 1,9$

Таблица 4

Table 4

Actual parameters of terms X_1 , X_2 and U at $q = 1.9$

Термы	Параметры	X_1	X_2	U
I^{51}	lmin ₅₁	-3,034	-820,387	0,929
	lpeak ₅₁	-3,034	-820,387	0,929
	rpeak ₅₁	-1,403	-379,254	0,967
	rlmin ₅₁	-0,369	-99,804	0,991
I^{52}	lmin ₅₂	-1,403	-379,254	0,967
	peak ₅₂	-0,369	-99,804	0,991
	rmin ₅₂	0,000	0,000	1,000
I^{53}	lmin ₅₃	-0,369	-99,804	0,991
	peak ₅₃	0,000	0,000	1,000
	rmin ₅₃	0,369	99,804	1,009
I^{54}	lmin ₅₄	0,000	0,000	1,000
	peak ₅₄	0,369	99,804	1,009
	rmin ₅₄	1,403	379,254	1,033
I^{55}	lmin ₅₅	0,369	99,804	1,009
	lpeak ₅₅	1,403	379,254	1,033
	rpeak ₅₅	3,034	820,387	1,071
	rmin ₅₅	3,034	820,387	1,071

Анализ зависимости качества управления ПИ-подобного нечеткого логического регулятора от параметров функций принадлежности термов его входных и выходных переменных

Анализ переходных процессов в контуре управления с ПИ-подобным нечетким логическим регулятором на временном интервале 3 000 с. позволил установить наличие двух их типов. При $q \in \{1,5; 1,7; 1,9; 2,1; 2,7; 3,1; 3,5\}$ ошибка регулирования в рассматриваемом промежутке времени достигает нулевого или близкого к нулевому значения (рис. 4); при $q \in \{2,3; 2,5; 2,9; 3,3\}$ ошибка регулирования колеблется с незатухающей амплитудой в окрестности нулевого значения (рис. 5). Полученные данные позволяют предположить, что для рассматриваемого объекта

управления нечеткие регуляторы, построенные на геометрической прогрессии со знаменателем $q < 2,3$, позволяют добиться удовлетворительного качества регулирования, тогда как при $q \geq 2,3$ соответствующие переходные процессы ведут себя непредсказуемо. Естественно, данное утверждение требует проверки путем перебора значений знаменателя прогрессии $q < 2,3$ с более мелким шагом.

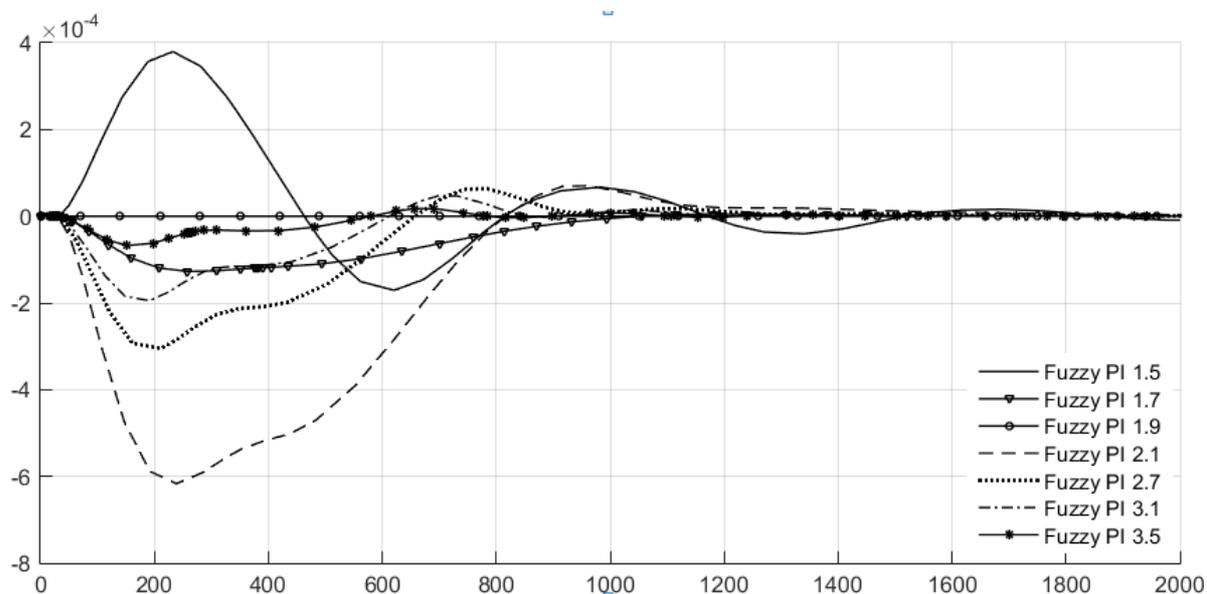


Рис. 4. Переходные процессы при $q \in \{1,5; 1,7; 1,9; 2,1; 2,7; 3,1; 3,5\}$
Fig. 4. Transient processes at $q \in \{1,5; 1,7; 1,9; 2,1; 2,7; 3,1; 3,5\}$

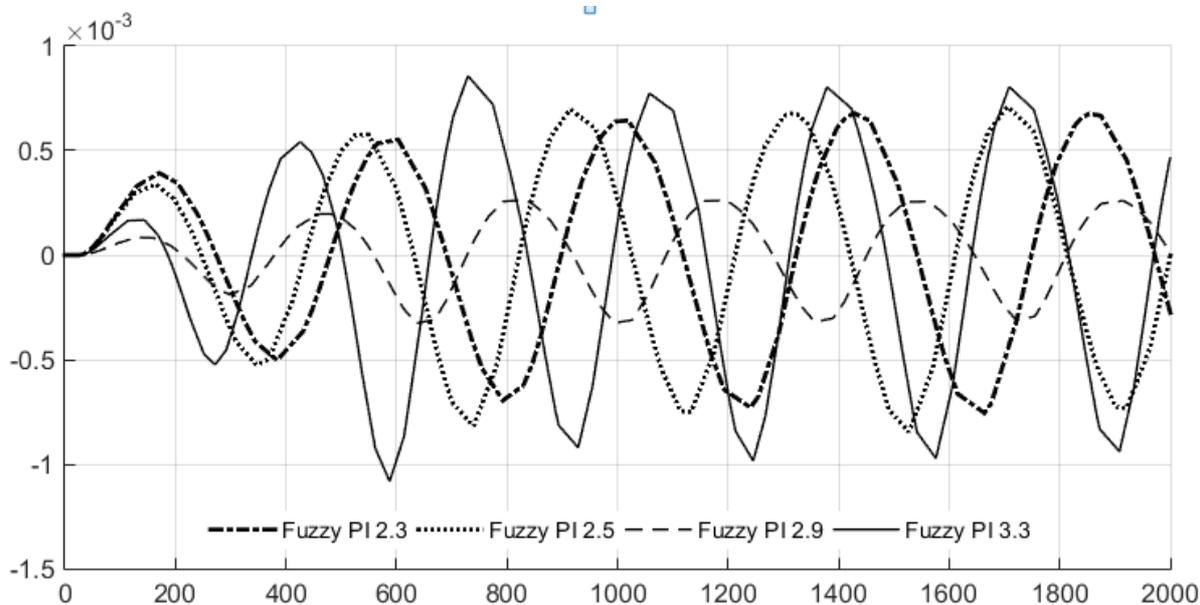


Рис. 5. Переходные процессы при $q \in \{2,3; 2,5; 2,9; 3,3\}$
Fig. 5. Transient processes at $q \in \{2,3; 2,5; 2,9; 3,3\}$

Для оценки качества управления нечетких логических регуляторов первого типа (Fuzzy PI 1,5, Fuzzy PI 1,7, Fuzzy PI 1,9, Fuzzy PI 2,1, Fuzzy PI 2,7, Fuzzy PI 3,1 и Fuzzy PI 3,5) помимо $\max|\Delta Y(t)|$ и t_p было подсчитано количество смен знака переходного процесса N (табл. 5). На основании сравнения полученных показателей между собой, а также с соответствующими показателями работы обычного ПИ-регулятора можно утверждать следующее:

Показатели качества управления нечетких регуляторов

Таблица 5

Control quality indicators of fuzzy regulators

Table 5

Регулятор	$\max \Delta Y(t) $	t_p	N
ПИ-регулятор	3,034	1990	0
Fuzzy PI 1,5	0,00034	762	8
Fuzzy PI 1,7	0,0001	584	1
Fuzzy PI 1,9	0,0	0	0
Fuzzy PI 2,1	0,0006	746	1
Fuzzy PI 2,7	0,0003	585	1
Fuzzy PI 3,1	0,0002	457	3
Fuzzy PI 3,5	0,00007	0	15

– По уровню $\max|\Delta Y(t)|$ все рассмотренные нечеткие регуляторы позволяют добиться существенно лучшего качества управления по сравнению с обычным ПИ-регулятором. При этом регулятор Fuzzy PI 1,9 позволяет добиться нулевого уровня $\max|\Delta Y(t)|$; установить, действительно ли регулятор является «идеальным» или полученный результат есть некая аномалия, без дополнительного исследования не представляется возможным. За исключением Fuzzy PI 1,9 формально лучшее значение данного показателя достигается регулятором Fuzzy PI 3,5.

– По величине времени регулирования t_p все рассмотренные нечеткие регуляторы также демонстрируют значительно лучшие результаты по сравнению с обычным ПИ-регулятором. Лучшими по данному критерию вновь являются регуляторы Fuzzy PI 1,9 и Fuzzy PI 3,5.

– По числу переходов через ноль все рассмотренные нечеткие регуляторы, кроме Fuzzy PI 1,9, уступают классическому ПИ-регулятору. Наихудшие результаты демонстрируют регуляторы с граничными показателями q , т. е. $N_{1,5} = 8$ при $q = 1,5$ и $N_{3,5} = 15$ при $q = 3,5$.

В предположении, что основным критерием является максимум модуля рассогласования при условии минимально возможного числа переходов через ноль и за исключением возможно аномального регулятора Fuzzy PI 1,9, лучшим нечетким регулятором является Fuzzy PI 1,7. При том же ограничении на смену знака рассогласования он также обеспечивает и минимальное время регулирования.

Заключение

Проведенное нами исследование позволяет утверждать, что использование геометрической прогрессии для настройки ПИ-подобных нечетких логических регуляторов позволяет получить весьма неплохие результаты управления. Естественно, как и в случае с обычными ПИД-регуляторами, далеко не все настройки дают удовлетворительное качество управления: при превышении знаменателя прогрессии величины 2,3 поведение системы становится непредсказуемым. Тем не менее показатели качества регулирования семи из одиннадцати нечетких регуляторов значительно превосходит соответствующие показатели классического ПИ-регулятора, при этом обеспечивается сокращение как времени регулирования, так и максимальной абсолютной величины рассогласования. При этом выявлен недостаток управления на нечеткой логике – наличие перехода ошибки регулирования через ноль, иногда не единственного. В связи с этим следует отметить, что при настройке регуляторов мы варьировали только длинами оснований функций принадлежности термов их параметров, т. е. были использованы не все возможности настройки. Кроме того, были рассмотрены регуляторы с параметрами, настроенными посредством геометрической прогрессии с одинаковым знаменателем, и вопрос об использовании разных знаменателей для разных параметров требует дальнейшего изучения. Также в процессе исследования было установлено, что при уровне знаменателя прогрессии $q = 1,9$ ошибка регулирования оказывается нулевой на всем интервале моделирования. Это может означать существование «идеального» ПИ-подобного нечеткого регулятора, однако данное предположение требует дополнительного исследования.

Литература

1. Прикладные нечеткие системы / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.; под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 368 с.
2. Джамбеков, А.М. Нечеткий регулятор стабилизации катализата / А.М. Джамбеков, И.А. Щербатов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2016. – № 4(52). – С. 106–114.
3. Comparison of Fuzzy-PID and PID Controller for Speed Control of DC Motor using LabVIEW / D. Somwanshi, M. Bunde, G. Kumar, G. Parashar // *Procedia Computer Science.* – 2019. – Vol. 152. – P. 252–260. – <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919306702>.
4. Надеждин, И.С. Системы управления нестационарным объектом на основе MPC-регулятора и ПИД-регулятора с нечеткой логикой / И.С. Надеждин, А.Г. Горюнов, Ф. Маненти // *Управление большими системами.* – 2018. – Вып. 75. – С. 50–75. – http://ubs.mtas.ru/search/search_results_ubs_new.php?publication_id=21760&BLOCK_ID=20.
5. Первушина, Н.А. Разработка методики синтеза нейро-нечеткого регулятора с настройкой генетическим алгоритмом / Н.А. Первушина, Д.Е. Доновский, А.Н. Хакимова // *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей».* – 2018. – № 4. – С. 82–90.
6. Разработка метода адаптации нечеткого регулятора, предназначенного для регулирования технологических параметров / Е.А. Муравьева, Д.С. Радакина, М.И. Шарипов и др. // *Вестник Чувашского университета.* – 2018. – № 1. – С. 137–145.
7. Rodriguez-Castellanos, J.E. A tuning proposal for direct fuzzy PID controllers oriented to industrial continuous processes / J.E. Rodriguez-Castellanos, V.H. Grisales-Palacio, J.E. Cote-Ballesteros // *IFAC PapersOnLine.* – 2018. – Vol. 51, iss. 4. – P. 657–662. – <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318304695>.
8. Pinto, S.E. Castillo Self-tuning neuro-fuzzy generalized minimum variance controller / S.E. Pinto Castillo, M.J. Grimble, R. Katebi // *IFAC Proceedings Volumes.* – 2005. – Vol. 38, iss. 1. – P. 103–108. – <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016371075>.
9. Anantwar, H. Fuzzy self tuning PI controller based inverter control for voltage regulation in off-grid hybrid power system / H. Anantwar, R. Lakshmikantha, Sh. Sundar // *Energy Procedia.* – 2017. – Vol. 117. – P. 409–416. – <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021732386X>.
10. Tamilselvan, G.M. Online tuning of fuzzy logic controller using Kalman algorithm for conical tank system / G.M. Tamilselvan, P. Aarthy // *Journal of Applied Research and Technology.* – 2017. – No. 15. – P. 492–503. – <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1665642317300792>.
11. Grey Wolf Optimizer-Based Approach to the Tuning of PI-Fuzzy Controllers with a Reduced Process Parametric Sensitivity / R.-E. Precup, R.-C. David, E.M. Petriu et al. // *IFAC-PapersOnLine.* – 2016. – Vol. 49, iss. 5. – P. 55–60. – <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316302853>.
12. El-Metwally, Kh.A. Power System Stabilization Using Swarm Tuned Fuzzy Controller / Kh.A. El-Metwally // *IFAC Proceedings Volumes.* – 2008. – Vol. 41, iss.2. – P. 11106–11111. – <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016407500>.
13. Koulocheris, D. Optimization Methodology For Tuning Fuzzy Logic Controllers / D. Koulocheris, H. Vrazopoulos, V. Dertimanis // *IFAC Proceedings Volumes.* – 2002. – Vol. 35, iss. 1. – P. 155–160. – <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147466701540000X>.
14. Затонский, А.В. Программные средства глобальной оптимизации настроек систем автоматического регулирования / А.В. Затонский. – М.: Издательский Центр РИОР. – 2013 – 136 с.
15. Власов, К.П. Теория автоматического управления / К.П. Власов. – Харьков: Изд-во Гуманитарный центр. – 2007. – 526 с.

Копотева Анна Владимировна, канд. техн. наук, доцент кафедры общенаучных дисциплин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, филиал в г. Березники, г. Березники, kopoteva_av@mail.ru.

Поступила в редакцию 11 июня 2020 г.

PI-TYPE FUZZY CONTROLLER TUNING BY MEMBERSHIP FUNCTIONS PARAMETERS DETERMINATION USING GEOMETRIC SERIES

A.V. Kopoteva, kopoteva_av@mail.ru

Perm State National Research Polytechnical University, Berezniki Branch,
Berezniki, Russian Federation

Introduction. In the issue we consider the possibility of geometric series application for fuzzy logic controller tuning. Triangular and trapezoidal membership functions are often used for fuzzy controller parameters description, and determination of those functions bases is a common way to tune the controller. Our related publications review revealed that there is no universal fuzzy controllers tuning method, and that approaches to the problem are usually quite difficult and not sufficiently described to understand and reiterate.

Aim. So for the purpose of our research we assumed that bases of fuzzy controller input and output parameters membership functions could be described with a numerical sequence. In that case the entire tuning procedure may be reduced to mere selection of such numerical sequence parameters.

Materials and methods. Geometric series with unit as a first member were chosen to avoid ambiguity, different ratios from 1.5 to 3.5 with an increment of 0.2 were chosen for second and third series members calculations. Calculated values were used as membership functions term bases for eleven subsidiary linguistic variables. Then we obtained ranges of control, control error and its time integral values variations for a specific control object using automatically tuned PI-controller. Using MATLAB FIS-editor we constructed PI-type fuzzy controller assuming that both of its input and an output parameters has five terms. By projecting the subsidiary linguistic variables gained earlier on each parameter range we obtain eleven different types of PI-type fuzzy controller tunings. They then were applied for time delay technological object controlling, seven of which proved to be functioning.

Results. Comparison of functioning fuzzy controllers' transient processes with corresponding ordinary PI-controller transient process allowed us to determine that all seven PI-type fuzzy controllers' quality criteria values are much better than those of ordinary PI-controller. **Conclusion.** Our research showed that usage of geometric series can be an effective and easy way to obtain fuzzy controllers tunings of satisfactory quality.

Keywords: fuzzy logic controller, membership function, geometric series, control object with time delay, control error, control time, PI-controller.

References

1. Asai K., Vatada D., Ivai S. *Prikladnyye nechetkiye sistemy* [Applied Fuzzy Systems]. Moscow, Mir, 1993. 368 p. (in Russ.)
2. Dzhambekov A.M., Iv. A. Sherbatov. [On Fuzzy Controller Of Catalysate Stabilization]. *Modern technologies. System Analysis. Modeling*, 2016, no. 4(52), pp. 106–114. (in Russ.)
3. Somwanshi D., Bundele M., Kumar G., Parashar G. Comparison of Fuzzy-PID and PID Controller for Speed Control of DC Motor using LabVIEW. *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 152, pp. 252–260.
4. Nadezhdin I.S., Goryunov A.G., F.Manenti. [Control Systems Of a Non-Stationary Plant Based On MPC And PID Type Fuzzy Logic Controller]. *Large-Scale Systems Control*, 2018, no. 75, pp. 50–75. (in Russ.)
5. Pervushina N.A., Donovskiy D. E., Khakimova A.N. [Development of Synthetic Methodology of Neuro-Fuzzy Controller Adjusted by Genetic Algorithm]. *Bulletin of Concern VKO «Almaz – Antey»*, 2018, no. 4, pp. 82–90. (in Russ.)
6. Muravyova E., Radakina D., Sharipov M., Enikeeva E., Artykaeva E. [Development of Method of Fuzzy Regulator Adaptation to Regulate Fuzzy Technological Parameters]. *Bulletin of the Chuvash University*, 2018, no. 1, pp. 137–145. (in Russ.)

7. Rodriguez-Castellanos J.E., Grisales-Palacio V.H., Cote-Ballesteros J.E. A Tuning Proposal for Direct Fuzzy PID Controllers Oriented to Industrial Continuous Processes. *IFAC PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 4, pp. 657–662. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896-318304695>.
8. Pinto Castillo S.E., Grimble M.J., Katebi R. Self-tuning Neuro-fuzzy Generalized Minimum Variance. *IFAC Proceedings Volumes*, 2005, vol. 38, no. 1, pp. 103–108. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016371075>.
9. Anantwar H., Lakshmikantha R., Sundar Sh. Fuzzy Self Tuning PI Controller Based Inverter Control for Voltage Regulation in off-grid Hybrid Power System. *Energy Procedia*, 2017, vol. 117, pp. 409–416. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021732386X>.
10. Tamilselvan G.M., Aarthi P. Online Tuning of Fuzzy Logic Controller Using Kalman Algorithm for Conical Tank. *Journal of Applied Research and Technology*, 2017, no. 15, pp. 492–503. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1665642317300792>.
11. Grey W., Precup R.E., David R.C., Petriu E.M., Szedlak-Stinean A.I., Bojan-Dragos C.A. Optimizer-Based Approach to the Tuning of PI-Fuzzy Controllers with a Reduced Process Parametric Sensitivity. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49, no. 5, pp. 55–60. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316302853>.
12. El-Metwally Kh.A. Power System Stabilization Using Swarm Tuned Fuzzy Controller. *IFAC Proceedings Volumes*, 2008, vol. 41, no. 2, pp. 11106–11111. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016407500>.
13. Koulocheris D., Vrazopoulos H., Dertimanis V. Optimization Methodology For Tuning Fuzzy Logic Controllers. *IFAC Proceedings Volumes*, 2002, vol. 35, no. 1, pp. 155–160. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147466701540000X>.
14. Zatonskii A.V. *Programmnye sredstva global'noi optimizatsii nastroek sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Software of global optimization of systems of automatic control: monograph]. Moscow, Izdatel'skii Tsentr RIOR, 2013. 136 p. (in Russ.)
15. Vlasov K.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic Control Theory]. Khar'kov, Izdvo Gumanitarnyy tsentr, 2007. 526 p. (in Russ.)

Received 11 June 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Копотева, В.А. Использование геометрической прогрессии для определения параметров функций принадлежности при настройке нечеткого регулятора ПИ-типа / В.А. Копотева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 18–28. DOI: 10.14529/ctcr200302

FOR CITATION

Kopoteva A.V. PI-type Fuzzy Controller Tuning by Membership Functions Parameters Determination Using Geometric Series Models for Coordinated Integrated Assessment in Decision-Making Problems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 18–28. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200302

ПРОГНОЗНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ГОРОДСКОЙ СИСТЕМОЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Г.В. Нетбай¹, В.Д. Онискив¹, В.Ю. Столбов¹, Р.Р. Каримов²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия,

²ООО «СОФТ-М» г. Пермь, Россия

Введение. Рассматривается задача прогнозного управления теплоснабжением потребителей с помощью нейросети, обученной на статистических данных, получаемых с подсистемы мониторинга. Оптимальное управление температурой воды на выходе из котельной позволяет экономить топливо и не допускать его перерасхода, особенно при быстрой смене погодных условий. Ожидаемая экономия топлива составит 5–15 % в зависимости от температуры воздуха в отопительный сезон и состояния теплосети.

Цель исследования. Разработка интеллектуального модуля для программно-аппаратной автоматизированной системы управления «Аугога. Тепловой баланс в ЖКХ», позволяющего вести автоматическое регулирование температуры воды на выходе котельной с учетом прогнозного изменения погодных условий при выполнении обязательных требований на температуру на входе к потребителям.

Материалы и методы. Искусственная нейронная сеть рассматривается в качестве основного инструмента, минимизирующего ошибки, связанные с ручным управлением температурой на выходе из котельной. Нейронные сети в виде многослойного персептрона и глубокого обучения LSTM позволяют предсказывать необходимую температуру котла с учетом инерционности теплосети и прогнозных температур воздуха. Для защиты модели от переобучения использовался метод dropout с вероятностью 0,2.

Результаты. Исследованы возможности нейросетей, обученных на основе статистических данных, предсказывать оптимальную температуру нагрева котла с учетом ограничений на температуру теплоносителя, поступающего в дома, и прогнозных значений температуры воздуха. Обосновано применение нейросетевой модели в виде многослойного персептрона, показавшей хорошие результаты при исследовании временных рядов. Представлен демонстрационный пример применения интеллектуальной системы управления для заданной городской теплосети.

Заключение. Предложенные методы и модели апробированы на реальных данных, что подтверждает возможность их использования при разработке интеллектуальной информационной системы управления теплоснабжением.

Ключевые слова: теплосеть, прогнозное управление, интеллектуальная система, нейросетевое моделирование, нейросети глубокого обучения, управление температурой котла, инерционность теплосети.

Введение

В настоящее время для управления газовыми котельными начинают внедрять системы, позволяющие в автоматическом режиме поддерживать необходимую температуру теплоносителя на выходе из котельной согласно утвержденному «Температурному графику» [1]. Как правило, требуемую температуру задает оператор дежурной смены в ручном режиме посредством ввода нужной температуры в интерфейсе блока управления котлом. Корректировка значений температуры производится один раз в два часа согласно показаниям термометра температуры окружающей среды.

Использование подобной автоматики позволяет обеспечить процесс рационального режима сгорания топлива с достижением максимально возможного КПД [2]. Это существенно снижает себестоимость процесса поддержания необходимого температурного режима в домах. Для рассматриваемой в данной работе котельной эффект достигает 12–15 % по годовой экономии газа. Отметим, что экономия зависит от температуры окружающей среды во время отопительного сезона.

Дальнейшим развитием идеи автоматизированной системы управления температурой тепло-

носителя является разработка и внедрение системы, поддерживающей оптимальное значение температуры в домах потребителей с учетом прогнозного значения температуры воздуха.

При движении теплоносителя по теплосети происходит частичное рассеивание его внутренней энергии в окружающую среду. Таким образом, существует разница в температуре теплоносителя на выходе из котельной и при достижении домов потребителей [3]. Разница этих температур есть величина не постоянная, и, кроме того, она изменяется в зависимости от температуры теплоносителя и окружающей среды нелинейно. Установление этой зависимости есть нетривиальная задача, для решения которой предполагается использовать современные достижения в области математики и, в частности, машинного обучения, нейросетевого моделирования и нечеткой логики [4, 5].

Сейчас для поддержания температуры в домах потребителей в рамках нормативов, организация, поставляющая услуги теплоснабжения, вынуждена поддерживать заведомо высокую температуру теплоносителя на выходе из котельной. Как следствие, температура в домах потребителей тоже значительно выше требований «Температурного графика». По предварительным расчетам, предоставленным компанией «СОФТ-М», занимающейся автоматизацией процесса теплоснабжения с помощью разработанной информационной системы управления «Аутога. Тепловой баланс в ЖКХ», снижение температуры теплоносителя в домах до уровня, не ниже требуемой на 3 %, позволит добиться дополнительной экономии топлива около 5–10 % за год в зависимости от температуры окружающей среды.

В данной статье рассматривается процесс разработки интеллектуального модуля автоматизированной системы управления тепловой сетью для городской котельной. Компанией, занимающейся теплоснабжением, были предоставлены статистические данные о температуре теплоносителя на выходе из котельной за период 01.12.2018–31.05.2019. Кроме того, были предоставлены данные о температуре теплоносителя на входе в дома и температура окружающей среды. Снятие показаний температуры теплоносителя производилось раз в 3 минуты. Значения температуры окружающей среды были записаны с интервалом раз в 10 минут. С использованием этих данных предполагается установить зависимость между температурой теплоносителя на входе в дома и его температурой на выходе из котельной. Для установления этой зависимости была построена математическая модель в виде обученной нейросети, которая положена в основу интеллектуального модуля автоматизированной системы управления тепловой сетью.

В последнее время отечественные [6] и зарубежные [7] исследователи проявляют большой интерес к использованию методов искусственного интеллекта для управления инженерными системами, обеспечивающими поддержание в заданных пределах параметров воздуха (температуры, влажности и химического состава) во внутренних помещениях зданий. В англоязычной литературе такие системы называют HVAC-System (Heating, Ventilation, & Air Conditioning System). Задача управление HVAC-системами близка к поставленной проблеме оптимального управления тепловой сетью, поэтому прежде всего вызывают интерес методы, которыми пользуются исследователи.

Например, в работе [8] для создания безмодельной (model-free) оптимальной балансировки HVAC-здания, которое было кондиционировано четырьмя кондиционерами, двумя электрическими чиллерами, градирней и двумя насосами, использовался современный метод обучения с подкреплением DQN, который позволил снизить общее потребление энергии на 15,7 % по сравнению с базовым режимом, сохранив концентрацию CO₂ в помещении ниже установленного ограничения. В работе [9] для повышения качества работы системы вентиляции метрополитена и снижения ее энергопотребления использовалась интеллектуальная система управления вентиляцией, основанная на алгоритме глубокого обучения с подкреплением. Построенная нейросеть позволила снизить потребление энергии до 14,4 % и повысить качество воздуха.

Приведенные примеры показывают, что проблема интеллектуального управления тепловой сетью, относящейся к HVAC-системам, является актуальной, а выбранный метод управления на основе нейросетевого моделирования обладает новизной.

Цель исследования – разработка интеллектуального модуля для программно-аппаратной автоматизированной системы управления «Аутога. Тепловой баланс в ЖКХ», позволяющего вести автоматическое регулирование температуры воды на выходе из котельной с учетом прогнозного изменения погодных условий при выполнении обязательных требований на температуру теплоносителя при входе к потребителям.

Оптимальное управление температурой воды на выходе котла позволит экономить топливо и не допускать его перерасхода, особенно при быстрой смене погодных условий.

1. Постановка задачи управления

На рис. 1 показана условная схема теплосети, основными элементами которой являются узлы, образующие её топологию: тепловые коллекторы (ТК) и многоквартирные дома (МКД), соединенные между собой трубами, по которым доставляется теплоноситель. Теплосеть представляет собой древовидную структуру, лепестками которой являются МКД.

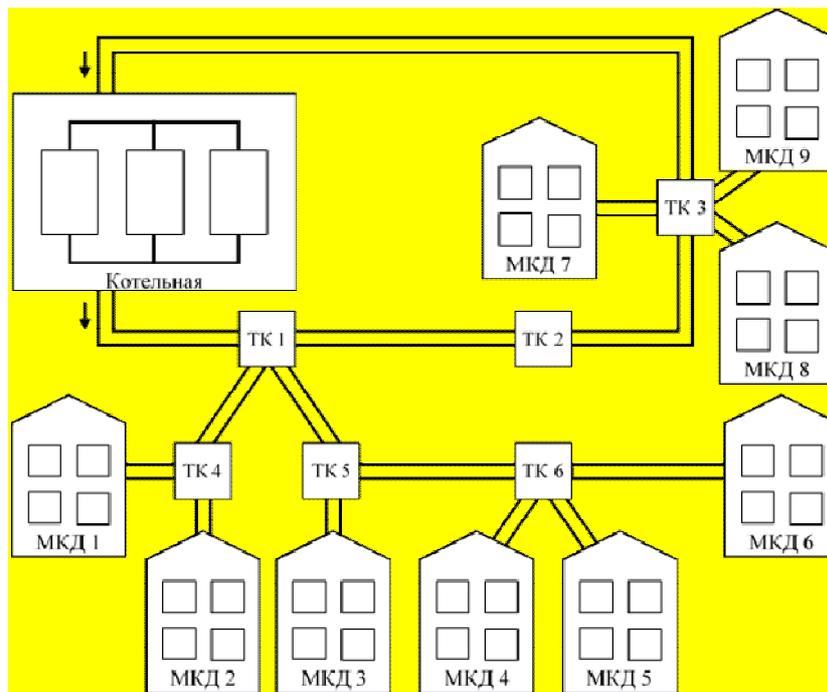


Рис. 1. Пример моделируемой древовидной структуры теплосети
Fig. 1. An example of a simulated tree structure of a heating network

Требуется найти такую оптимальную температуру на выходе из котельной в каждый заданный момент времени, при которой будут выполняться следующие ограничения при заданной прогнозной температуре воздуха:

- полностью исключить отклонение температуры теплоносителя на входе в отапливаемые здания от заданной в меньшую сторону;
- совокупное отклонение температуры теплоносителя на входе в отапливаемые здания от заданных в большую сторону должно быть минимальным.

Сформулированная выше задача прогнозного управления может быть записана в математическом виде как дискретная по времени задача управления температурой на выходе из котельной в зависимости от прогнозного значения температуры воздуха.

Пусть в некоторый момент t известно температурное состояние теплосети, а именно: T_k – температура воды на выходе из котла, $T_i, i = 1 \dots m$, – температура теплоносителя на входе в i -й МКД, m – количество потребителей в сети. Кроме того, в моменты t и $(t + \Delta t)$ известны наружная температура воздуха T_e и ее прогнозируемое изменение $T_e + \Delta T_e$ за время Δt . Необходимо определить такое изменение температуры котла ΔT_k за время Δt , что в момент $(t + \Delta t)$ выполняются ограничения типа неравенства:

$$T_i(t + \Delta t) \geq T^*(T_e + \Delta T_e), \forall i = 1 \dots m.$$

Здесь T^* – нормативная температура теплоносителя на входе в МКД, зависящая от актуальной температуры наружного воздуха (определяется соответствующими нормативными документами из заданного температурного графика). При этом сумма $\sum_{i=1}^m (T_i(t + \Delta t) - T^*(T_e + \Delta T_e)) \rightarrow 0$.

Следует отметить, поставленная задача имеет ряд особенностей, затрудняющих ее решение. Во-первых, температуры на входе в дома зависят не только от T_k и T_e , но и от топологии теплосети, скорости движения теплоносителя, состояния теплосети и ее теплопотерь. Другими словами, зависимость между T_k и температурами $T_i, i = 1 \dots m$ носит сложный нелинейный характер, зависящий от многих факторов. Во-вторых, любая теплосеть обладает инерционностью, под которой понимается время запаздывания реакции изменения температуры на входе в дом от изменения температуры на выходе из котельной. Это время заранее неизвестно и зависит от топологии сети и скорости движения теплоносителя. Безусловно, его целесообразно знать для выбора периода прогнозного управления.

Для решения этих проблем возможны два подхода. Первый из них связан с необходимостью построения математической модели теплосети, позволяющей находить все необходимые нелинейные зависимости. Другой подход предполагает безмодельное оптимальное управление (model-free optimal control [8]), при котором все зависимости определяются из статистических данных в ходе обучения нейросети. Очевидно, что второй путь обладает необходимой общностью и является более эффективным. Он используется в данной работе.

2. Нейросетевое моделирование

В качестве нейросетевых моделей рассматривались многослойные перцептроны и рекуррентные сети глубокого обучения типа LSTM [4, 10]. В ходе построения оптимальной архитектуры нейросети были опробованы сети с 1, 2 и 3 скрытыми слоями. Лучшие результаты показал многослойный перцептрон с тремя скрытыми слоями. Для защиты от переобучения использовался метод dropout [11, 12] с вероятностью 0,2. Схематичное изображение итоговой архитектуры перцептрона с 3 слоями и 224 нейронами показано на рис. 2. Количество входов в нейросеть соответствует числу потребителей в системе и равно m . На выходе получается значение температуры теплоносителя, равной температуре на выходе из котельной.

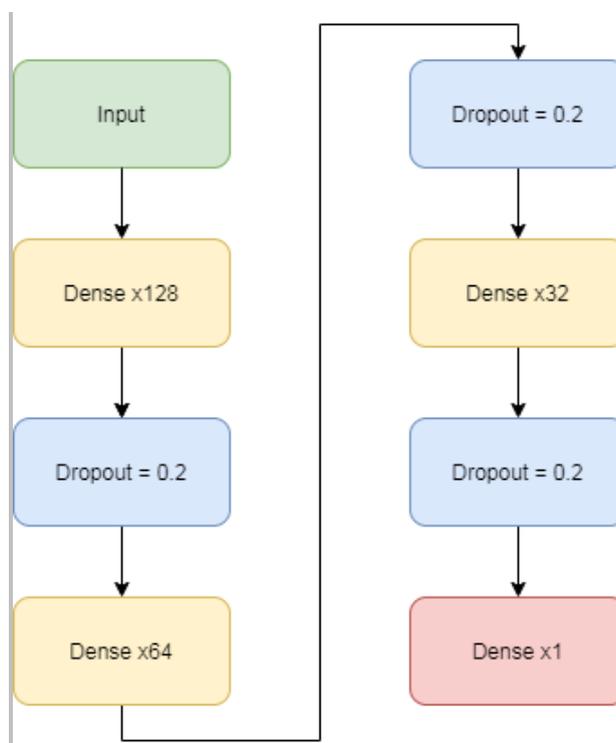


Рис. 2. Архитектура нейросети
Fig. 2. The architecture of the neural network

Для проверки работоспособности нейросети использовались статистические данные, получаемые с помощью автоматизированной системы управления «Aurora. Тепловой баланс в ЖКХ»

в процессе ручного управления теплоснабжением на котельной г. Лысьва Пермского края в период отопительного сезона 2018/19 года. Модель обучалась в ходе 200 итераций. В качестве функции потерь было выбрано квадратичное отклонение. При обучении нейросети использовался оптимизатор Adam [13]. Достигнутые моделью показатели приведены в табл. 1.

Проверка на тестовом множестве показала, что модель корректно устанавливает зависимость между температурой в домах и на выходе из котельной. Результат работы модели на тестовом множестве приведен на рис. 3. График был сглажен при помощи алгоритма Ханна [14].

Достигнутые моделью показатели
 Indicators achieved by the model

Таблица 1

Table 1

Показатель	Значение на обучающем множестве	Значение на тестовом множестве
Среднее квадратичное отклонение, %	0,87	1,3
Средняя относительная ошибка, %	1,3	2,1
Среднее значение ошибки, град.	–	0,35
Максимальное значение ошибки, град.	–	3,43

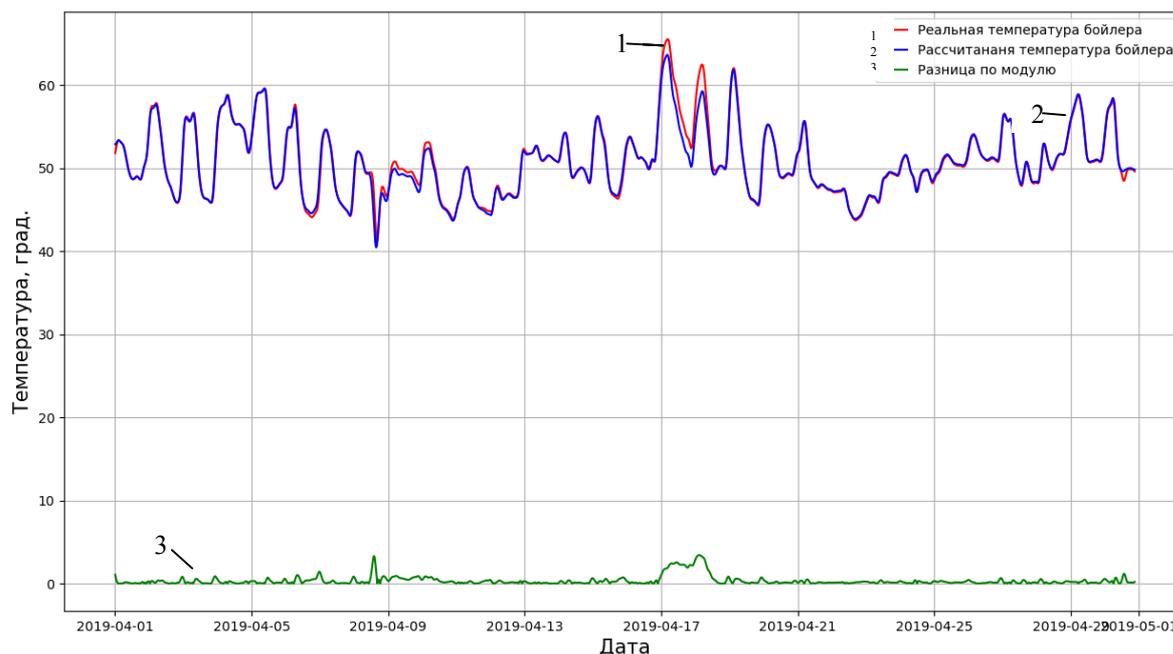


Рис. 3. Результаты работы модели на тестовом множестве (1 – реальная температура теплоносителя на выходе из котельной, 2 – предсказанная моделью, 3 – модуль разности температур)

Fig. 3. The results of the model operation on the test set (1 – real temperature coolant at the outlet from the boiler room, 2 – predicted by the model, 3 – difference modulus temperatures)

Из приведенных результатов видно, что обученная нейросеть довольно точно определяет температуру теплоносителя на выходе из котельной, используя в качестве входных данных температуры теплоносителя на входе к потребителям тепла.

Представленные результаты обучения и тестирования нейросети показывают, что построенную модель можно будет использовать для вычисления требуемой температуры теплоносителя на входе в дома и выполнять управление котельной.

3. Анализ результатов

При управлении на основе прогнозной температуры окружающей среды по заданным температурным графикам вычисляются требуемые температуры носителя тепла на входе в дома, а на основе этой температуры вычисляется с помощью нейросети требуемая температура на выходе из котельной.

Для тестирования возможности прогнозного управления был выбран период отопительного сезона с 01.02.2019 по 01.03.2019. Для этого месяца были собраны данные о температуре воздуха, среднее значение которой оказалось наиболее низким. Период управления был задан равным 3 часам, учитывая инерционность исследуемой теплосети и возможности получения данных о прогнозе погоды. При этом в процессе управления в каждый заданный момент времени по прогнозируемому значению температуры воздуха на 3 часа вперед определялось нормативное значение температуры теплоносителя на входе в дома, которое подавалось на вход обученной нейросети. На выходе нейросети получалось оптимальное значение температуры теплоносителя на выходе из котельной, которое должно обеспечивать температуры на входе в дома, близкие к нормативным значениям.

Результат работы модели, а также значения реальной температуры теплоносителя на выходе из котельной показаны на рис. 4.

Из приведенных графиков видно, что нейросеть изменяет температуру теплоносителя на выходе из котельной по сравнению с той, которая была зафиксирована датчиками при ручном управлении. При этом отклонения температур наблюдаются в обе стороны. Например, в период со 2-го по 5-е февраля 2019 года, когда наблюдалось резкое похолодание (см. табл. 2), нейросеть предлагает повысить температуру примерно на 8 градусов по сравнению с той, которая задавалась в реальных условиях оператором котельной.

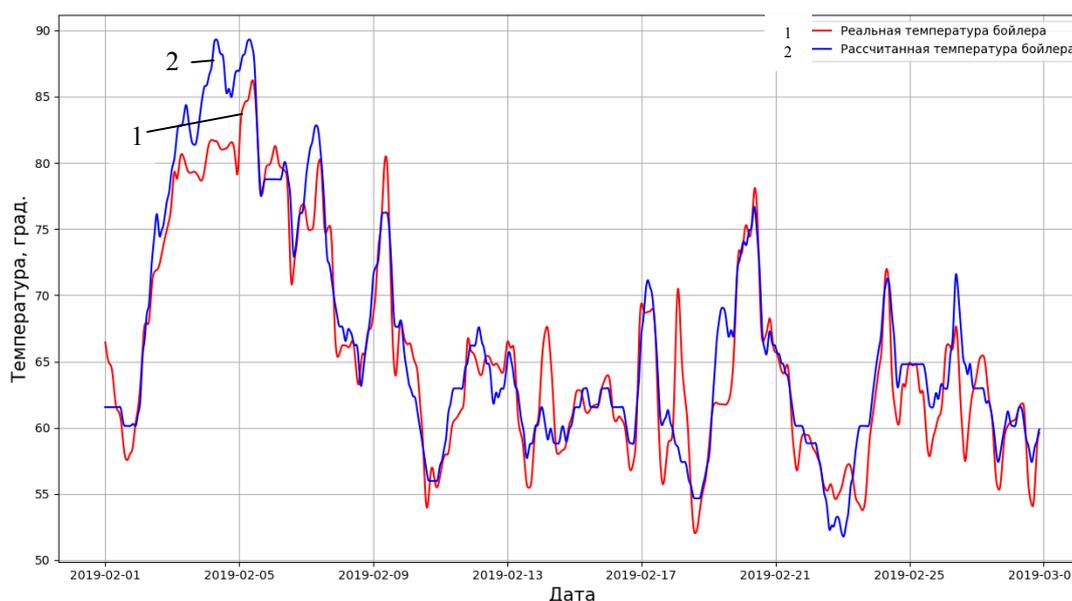


Рис. 4. Изменение температуры на выходе из котельной (2 – предсказанная моделью температура теплоносителя, 1 – реальная температура за этот же период)
Fig. 4. Change in temperature at the outlet of the boiler room (2 – predicted by the model coolant temperature, 1 – real temperature for the same period)

Это позволило бы не допустить снижение температуры теплоносителя на входе в некоторые дома ниже нормативных значений. В целом из анализа графиков на рис. 4 видно, что нейросетевое управление является более плавным по сравнению с ручным, при котором оператор каждые 3 часа регулирует температуру теплоносителя на выходе из котельной без учета прогноза погоды на несколько часов вперед, а только по значению температуры воздуха в данный момент времени.

В табл. 2 приведены осредненные данные по прогнозным температурам воздуха, а также прогнозные и зафиксированные датчиками температуры на входе в один из домов системы теплоснабжения, находящегося примерно в середине теплосети. Осреднение проводилось по периодам времени, в которых наблюдались значительные скачки по температуре воздуха.

Из табл. 2 видно, что колебания температуры воздуха в рассматриваемый период времени достигали 20 градусов мороза, а это предполагало необходимость частого регулирования температуры теплоносителя.

Сравнение реальных и предсказанных значений температур на входе в дом представлено на рис. 5.

Таблица 2

Нормативные и предсказанные значения температур на входе в дома
 в зависимости от прогноза температуры воздуха

Table 2

Standard and predicted temperatures at home entrances depending on the forecast air temperature

Начальная дата (число, месяц, время)	Конечная дата (число, месяц, время)	Средняя реальная температура теплоносителя на входе в дом, град	Средняя предсказанная температура теплоносителя на входе в дом, град	Отклонение, град	Среднее значение температуры воздуха, град
01.02 00:00	01.02 08:00	60,80	60,46	-0,34	-7,40
01.02 08:00	05.02 12:00	77,36	78,20	0,84	-20,06
05.02 12:00	06.02 06:00	78,17	78,17	0,00	-22,88
02.06 06:00	09.02 18:00	72,11	72,53	0,42	-15,88
09.02 18:00	10.02 18:00	61,05	61,04	-0,02	-7,65
10.02 18:00	12.02 08:00	61,54	62,00	0,45	-7,87
12.02 08:00	13.02 08:00	62,93	62,87	-0,06	-8,92
13.02 08:00	13.02 18:00	58,78	59,38	0,60	-5,95
13.02 18:00	14.02 08:00	59,41	58,91	-0,50	-6,59
14.02 08:00	18.02 00:00	61,40	61,71	0,31	-7,93
18.02 00:00	19.02 00:00	55,72	55,41	-0,31	-3,75
19.02 00:00	22.02 08:00	65,15	65,57	0,41	-10,61
22.02 08:00	23.02 06:00	52,86	52,59	-0,26	-1,68
23.02 06:00	01.03 00:00	62,11	62,63	0,53	-8,30

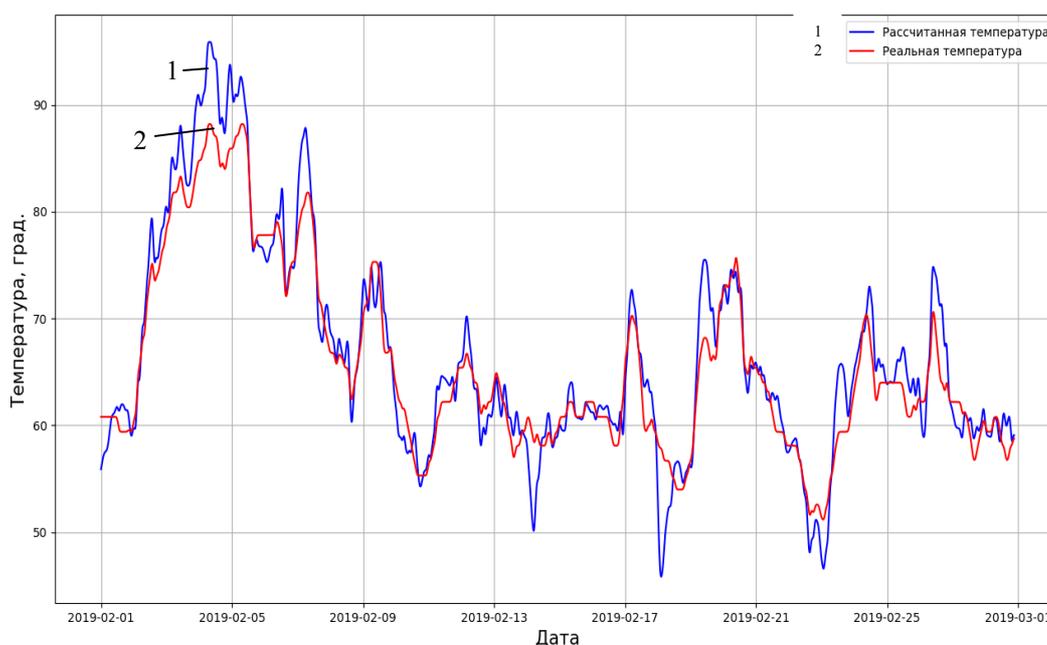


Рис. 5. Изменение температуры на входе в дом (2 – реальная температура в доме потребителя, 1 – восстановленная по предсказанным данным)
 Fig. 5. Change in temperature at the entrance to the house (2 – real temperature in the consumer's house, 1 – restored according to the predicted data)

Из этого графика видно, что предсказанная нейросетью температура на выходе из котельной обеспечивает близкие к реальным значения температуры на входе в дом. Однако нейросетевое управление позволяет более быстро реагировать на изменения температуры воздуха путем корректировки температуры на выходе из котельной, обеспечивая температуры теплоносителя на входе к потребителю, близкие к нормативным значениям.

Заключение

В результате проведенных исследований была сформулирована и поставлена весьма актуальная задача безмодельного оптимального прогнозного управления локальной системой теплоснабжения потребителей. Обоснован и выбран метод решения задачи, имеющей существенно нелинейный характер. Определена и обучена на реальных статистических данных нейросеть в виде персептрона с тремя скрытыми слоями, позволяющая получать адекватные результаты. Обученная нейросеть была использована при прогножном управлении локальной системой городского теплоснабжения. Представлены результаты решения демонстрационной задачи управления теплоснабжением, подтверждающие возможность применения предложенного подхода безмодельного управления.

Литература

1. Белоусов, О.А. Интеллектуальная система управления и мониторинга газовой котельной / О.А. Белоусов, С.В. Иванов // Программные продукты и системы. – 2012. – № 1. – <https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnaya-sistema-upravleniya-i-monitoringa-gazovoy-kotelnoy>.
2. Регулирование температуры теплоносителя. Энергетика простыми словами. – <https://energoworld.ru/blog/regulirovanie-temperatury-teplonositelya>.
3. Панферов, В.И. Об оптимальном управлении температурой теплоносителя в тепловых сетях / В.И. Панферов, О.Ф. Гавей // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. – № 4. – <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-optimalnom-upravlenii-temperaturoy-teplonositelya-v-teplovyyh-setyah>.
4. Ясницкий, Л.Н. Интеллектуальные системы / Л.Н. Ясницкий. – М.: Лаборатория знаний, 2016. – 221 с.
5. Истомин, Д.А. Экспертная система оценки технического состояния узлов электроцентробежного насоса на основе продукционного представления знаний и нечеткой логики / Д.А. Истомин, В.Ю. Столбов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 133–143.
6. Комаров, Н.М. Управление инженерными системами интеллектуального здания с использованием информационного и инфографического моделирования / Н.М. Комаров, В.Г. Жаров // СЕРВИС Plus. – 2013. – № 2. – С. 74–81.
7. <https://www.link-labs.com/blog/smart-hvac>.
8. Ki Uhn Ahn, Cheol Soo Park. Application of deep Q-networks for model-free optimal control balancing between different HVAC systems // Science and Technology for the Built Environment. – 2020, Vol. 26, iss. 1, P. 61–74.
9. A deep reinforcement learning-based autonomous ventilation control system for smart indoor air quality management in a subway station / S. Heo, K.-J. Nam, J. Loy-Benitez et al. // Energy & Buildings. – 2019. – Vol. 202.
10. Sepp Hochreiter, Jürgen Schmidhuber. Long short-term memory // Neural Computation: journal. – 1997. – Vol. 9, no. 8. – P. 1735–1780.
11. Переобучение в статистике и машинном обучении. – <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BE%D0%B1%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5> (дата обращения: 22.05.2020).
12. Dropout – метод решения проблемы переобучения в нейронных сетях. – <https://habr.com/ru/company/wunderfund/blog/330814> (дата обращения: 22.05.2020).
13. Kingma, D.P. Adam: A Method for Stochastic Optimization / D.P. Kingma, J.L. Ba. arXiv:1412.6980 2014.
14. Некоторые оконные функции и их параметры. – <http://www.dsplib.ru/content/win-add/win.html> (дата обращения: 02.06.2020).

Нетбай Георгий Владимирович, инженер кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь; netbay.georgij@gmail.com.

Онискив Владимир Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь; Oniskivf@gmail.com.

Столбов Валерий Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной математики, механики и биомеханики; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь; valeriy.stolbov@gmail.com.

Каримов Руслан Расихович, генеральный директор ООО «СОФТ-М», г. Пермь; r.karimov@softm.tv.

Поступила в редакцию 30 июня 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr200303

MANAGEMENT OF A LOCAL URBAN HEAT SUPPLY SYSTEM BASED ON NEURAL NETWORK MODELING TAKING INTO ACCOUNT THE WEATHER FORECAST

G.V. Netbay¹, netbay.georgij@gmail.com,
V.D. Oniskiv¹, Oniskivf@gmail.com,
V.Yu. Stolbov¹, valeriy.stolbov@gmail.com,
R.R. Karimov², r.karimov@softm.tv

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation,

²SOFT-M LLC, Perm, Russian Federation

Introduction. The article deals with the problem of managing the heat supply of consumers, taking into account the weather forecast using a neural network. The monitoring subsystem was used to obtain statistical data that was used to train the neural network. Optimal control of the temperature of the coolant allows you to save fuel especially effectively, in case of rapid changes in weather conditions. The expected fuel economy reaches 5–15 % depending on the air temperature in the season and the state of the heating network.

Aim. The purpose of the research is to develop an intelligent module for the automated control system “Aurora Heat balance in GCH”. The intelligent module allows you to automatically adjust the water temperature in network, taking into account the weather forecast and when the mandatory temperature limits for consumers are met.

Materials and methods. Artificial neural network is considered as the main tool that minimizes errors in manual control of the boiler room temperature. A neural network in the form of a multi-layer perceptron and a deep learning LSTM procedure were used. This made it possible to predict the temperature of the coolant taking into account the inertia of the network and the forecast of air temperature. To protect the model from overtraining, the Dropout method was used with a probability of 0.2.

Results. The possibilities of neural networks to predict the optimal heating temperature of the boiler are investigated. This temperature is calculated taking into account restrictions for heat consumers and taking into account the forecast air temperature. The application of a neural network model in form of a multilayer perceptron is justified. A demonstration example of using an intelligent information system for heat supply management is presented.

Conclusion. The proposed methods and models are tested on real data. This confirms the possibility of their use in the development of intelligent information systems for heat supply management.

Keywords: heating network, forecast management, intelligent system, neural network modeling, deep leaning neural networks, temperature control of boiler, inertia of the heating network.

References

1. Belousov O.A., Ivanov S.V. [Intelligent Control System and Monitoring of a Gas Boiler]. *Software products and systems*, 2012, no. 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnaya-sistema-upravleniya-i-monitoringa-gazovoy-kotelnoy> (accessed 02.06.2020).
2. *Regulirovaniye temperatury teplonosatelya. Energetika prostymi slovami* [Regulation of the temperature of the coolant. Energy in simple words] Available at: <https://energoworld.ru/blog/regulirovanie-temperatury-teplonosatelya/> (accessed 02.06.2020).
3. Panferov V.I., Gavey O.F. [On the Optimal Control of the Coolant Temperature in Heating Networks]. *Bulletin of South Urals State University. Series: Computer technology, control, radio electronics*, 2014, no. 4, pp. 65–70 (in Russ).
4. Yasnitsky L.N. *Intellektual'nyye sistemy* [Intelligent systems]. Moscow, Laboratoriya znaniy, 2016. 221 p. 4.
5. Istomin D.A., Stolbov V.Yu. [An Expert System for Assessing the Technical Condition of Nodes of an Electric Centrifugal Pump Based on the Production Representation of Knowledge and Fuzzy Logic]. *Bulletin of South Urals State University. Series: Computer technology, control, radio electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 133–143. (in Russ)
6. Komarov N.M., Zharov V.G. [Management of Engineering Systems of an Intelligent Building Using Information and Infographic Modeling]. *SERVICE Plus*, 2013, no. 2, pp. 74–81. (in Russ)
7. *What's So Cool About Smart HVAC Systems?* Available at: <https://www.link-labs.com/blog/smart-hvac> (accessed 02.06.2020).
8. Ki Uhn Ahn, Cheol Soo Park. Application of Deep Q-networks for Model-free Optimal Control Balancing Between Different HVAC Systems. *Science and Technology for the Built Environment*, 2020, vol. 26, no. 1, pp. 61–74.
9. SungKu Heo, KiJeon Nam, Jorge Loy-Benitez, Qian Li, SeungChul Lee, ChangKyoo Yoo. A Deep Reinforcement Learning-based Autonomous Ventilation Control System for Smart Indoor Air Quality Management in a Subway Station. *Energy & Buildings*, 2019, vol. 202.
10. Sepp Hochreiter, Jürgen Schmidhuber. Long Short-term Memory. *Neural Computation: journal*, 1997, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780.
11. *Pereobucheniye v statistike i mashinnom obuchenii* [Retraining in Statistics and Machine Learning]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Переобучение> (accessed 22.05.2020).
12. *Dropout – metod resheniya problemy pereobucheniya v neyronnykh setyakh* [Dropout – a Method for Solving the Problem of Retraining in Neural Networks]. Available at: <https://habr.com/ru/company/wunderfund/blog/330814/> (accessed 22.05.2020).
13. Kingma D.P., Ba J.L. *Metod stokhasticheskoy optimizatsii*. [A Method for Stochastic Optimization], 2014, arXiv:1412.6980. Available at: <https://arxiv.org/abs/1412.6980>.
14. *Nekotoryye okonnyye funktsii i ikh parametry* [Some Window Functions and Their Parameters]. Available at: <http://www.dsplib.ru/content/winadd/win.html> (accessed 02.06.2020).

Received 30 June 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Прогнозное управление локальной городской системой теплоснабжения на основе нейросетевого моделирования / Г.В. Нетбай, В.Д. Онискив, В.Ю. Столбов, Р.Р. Каримов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 29–38. DOI: 10.14529/ctcr200303

FOR CITATION

Netbay G.V., Oniskiv V.D., Stolbov V.Yu., Karimov R.R. Management of a Local Urban Heat Supply System Based on Neural Network Modeling Taking into Account the Weather Forecast. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 29–38. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200303

INTEGRATION OF FIRE PROTECTION SYSTEMS BASED ON THE DIGITAL AUTOMATIC MODEL

K.M. Volkova, ksenifire@bk.ru

State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

The development of refineries increases the number and scale of fires and accidents, which cause damage both to the facilities themselves and to the surrounding buildings and structures, lives and health of people, the environment. That is why increasing the level of fire protection systems at refineries remains one of the most important components of ensuring the protection of the population from anthropogenic threats.

The article presents the results of the analysis of accidents and fires at oil refineries (refinery) for 2015–2019. The issue of necessity to integrate fire protection system at the refinery is considered. The process of creation and functioning of the automated integrated fire protection management system is described in the article. This system is a new approach to solving the issue of safety of industrial facilities of oil refining industry. Creation of a new model of fire protection system based on digital automatic system is described. The article considers the scheme of generalized structure of digital automatic machine and graphs of digital automatic machine of automated integrated fire detection and monitoring system.

The developed technology makes it possible to process the incoming signal contained in cyclograms into an intermediate form for synthesis of digital automatic machines by means of innovative tools.

Keywords: fire protection, automated control system, digital automatic machine, detection and monitoring system.

Introduction

The oil refining industry plays an important role in the country's economy and at the same time carries a danger as a source of fire and man-made accidents. The development of oil refineries increases the number and scale of fires and accidents, which cause damage both to the objects itself and to the surrounding buildings and structures, lives and health of people, environment. That is why increasing the level of fire protection systems at refineries remains one of the most important components of ensuring the protection of the population from anthropogenic threats [1]. Accidents and fires at oil refineries (Refineries) are difficult conditions with a rapid spread of fire to nearby areas and vehicles, which most often turn into a catastrophe whose material damage is huge. Refinery fires can be significant because of the large volume of flammable and combustible liquids stored in the territory [1].

Refinery accident and fire analysis

According to the data, the number of fires and explosions at the refinery over the last 5 years has been analyzed. The analysis results show that the annual number of fires ranges from 30 to 50. According to the analysis for 2015–2019, there were 186 fires (Fig. 1).

Refinery fires cause great material damage as expensive equipment, raw materials and communications cannot be restored. Fig. 2 shows that the average material damage from one fire is more than 1 million rubles, this value is much higher than the average damage from the total number of fires. Whereas, larger fires at refineries cause several times more damage. The average damage is the expected damage, i.e. more likely, and the maximum damage is the damage in the worst-case scenario. This large difference between the expected damage and the maximum damage makes it possible to conclude that refinery fire protection needs to be improved by integrating fire protection systems.

In order to effectively address the issue of integrating fire protection systems in refineries, it is necessary to understand the causes of fire. During the analysis the main interconnected groups of fire causes have been formed (Fig. 3).

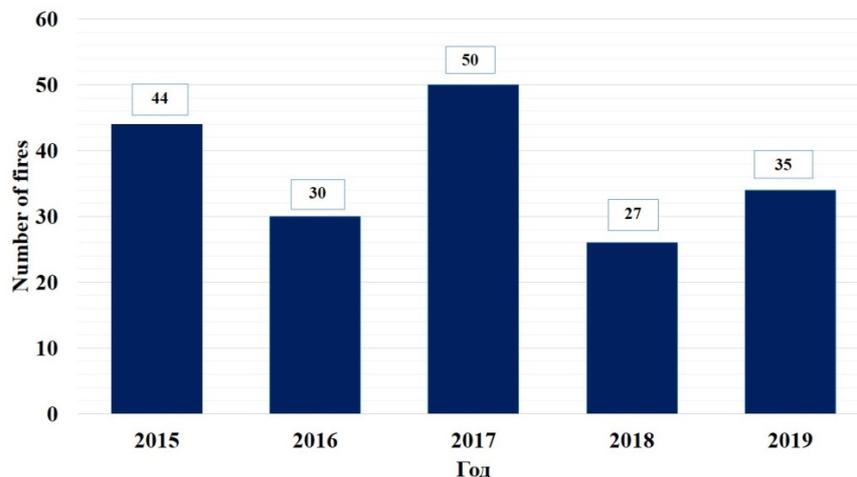


Fig. 1. Number of fires at oil refineries

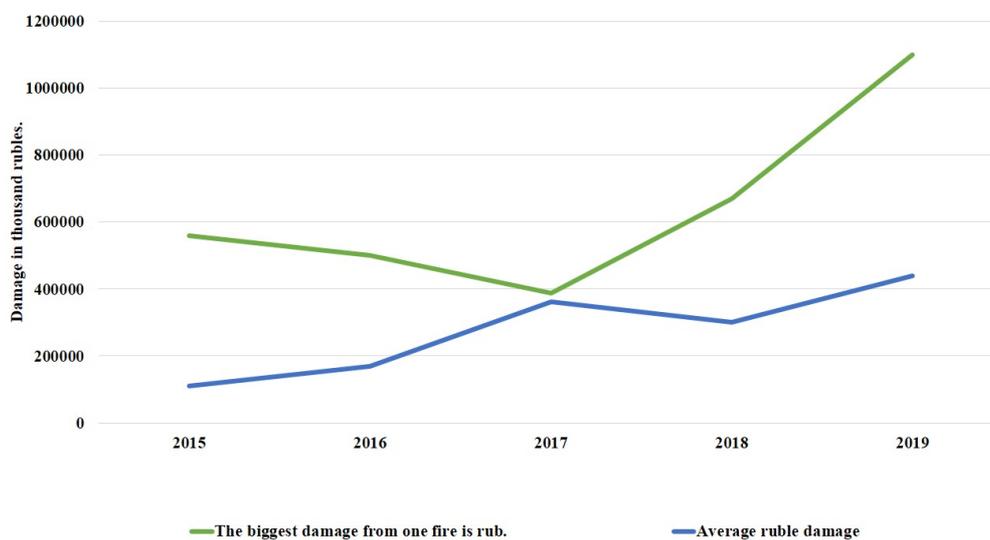


Fig. 2. Damage from fires at oil refineries

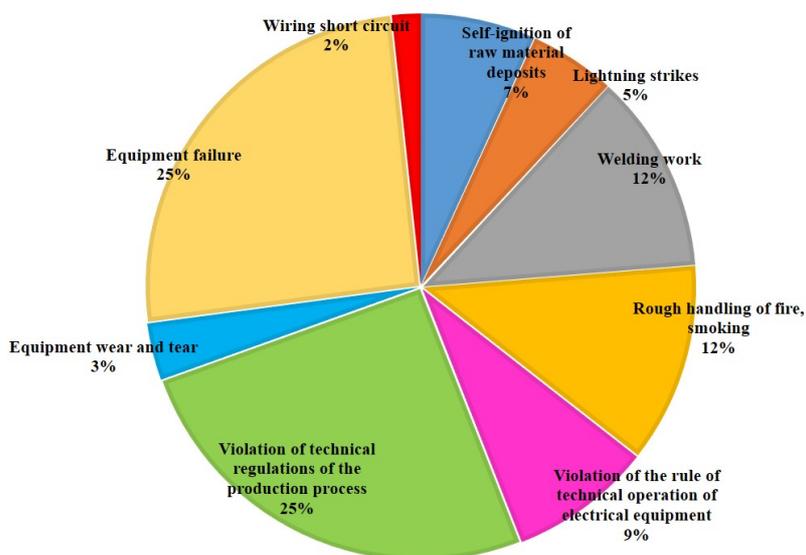


Fig. 3. Main causes of fires

Based on the diagram of analysis of the main causes of fire, it can be concluded that the main ones are:

- emergency operation of the equipment;
- violation of the technological regulations of the production process.

Technological process of refinery is complicated, so it is necessary to control from the side of service personnel for the regulatory values of parameters and the timeliness of measures for localization and liquidation of emergency situations, as there is a possibility of output of parameters for critical values, depressurization of equipment (from partial to full) and release of hazardous substances [2]. Errors in transient modes (start and stop of equipment), at operations, at drainage, repair, preventive and other works connected with unstable modes, release and filling of equipment with hazardous substances represent special danger in technological process of refinery [2].

As a result, the analysis of reasons of origin of fires on refineries has defined, that all of them have essential feature: the reason of these fires, as a rule, the whole set of circumstances, each of which by itself could not initiate a large fire, and only their set can lead to scale consequences. In turn, the question on integration of system of fire-prevention protection of oil refining objects has matured.

Every year technological processes of refineries become more advanced, innovative technologies become more widespread, the process and organization of production in the majority is accompanied by the use of potentially dangerous technologies, and this has led to the complication of equipment and processes, as the provision of integrated safety of technical production at the enterprise includes automated integrated fire protection systems (AISPEZ). Automated integrated systems of fire detection and monitoring, fire extinguishing, evacuation and smoke removal play one of the main roles in the structure of technological processes of industrial facilities.

The development and distribution of these systems requires new solutions in the synthesis of their operation models. In the event of an emergency situation, fire, or fire at an industrial facility, an automated integrated fire detection and monitoring system (AISOMP) should immediately operate. For the purpose of demonstration of all cause-and-effect relations in AISOMP it will be rational to apply structural-functional models of the digital automatic machine (CA), with their help it is possible to minimize and exclude probability of errors at the further synthesis of the automatic machine project by means of the specialized software. Similarly, AISOMP will provide an opportunity to formalize the synthesis process of transitions and outputs functions, without which it is impossible to build CA models [3]. Thus, the main purpose of synthesis of the model of digital automaton and automated integrated fire detection system is to minimize and exclude the probability of errors arising from the improvement of methods of information transformation into AISOMP. The system based on the CA model is synthesized in a specialized design environment, such as Active-HDL. The model is built in a cyclogram, which displays the AISOMP cycle [4]. The system design algorithm according to the proposed integrated model is shown in Fig. 4.

According to a given cyclogram, structural-functional models of digital automata are designed, for which unified tables of transitions and outputs functions are compiled, and then a hierarchical system model of CA is designed.

The sequence of switching mechanisms on and off is determined by the technologist, and cause-effect relations between commands are indicated on the cyclogram. To start AISOMP it is necessary to carry out several of conditions of its occurrence: an emergency mode, a flame, smoke, collapse of building designs the received control information, it is necessary to transform to a logic signal convenient for working out of algorithms, and debugging of a program code of the controllers realised in the form of CA [5, 6].

In the structure of CA there is a transition graph. The transition graph has the following properties:

- a) the graph does not contain parallel arcs;
- b) there is one vertex in the set of vertices of the graph, which is called the input of the graph;
- c) in the set of vertices of the graph one vertex, which is called the output of the graph, is selected;
- d) each vertex of the graph reaches its output.

Fig. 5 shows the screen of the modeling panel of the digital machine, the working area of which is divided into two parts: the base of announcements and the working area in which the model CA is designed [7]. The declaration header includes the declaration of the automaton's input and output ports. The above functions of Active-HDL environment reduce the time-consuming design and verification of CA models for automated control devices.

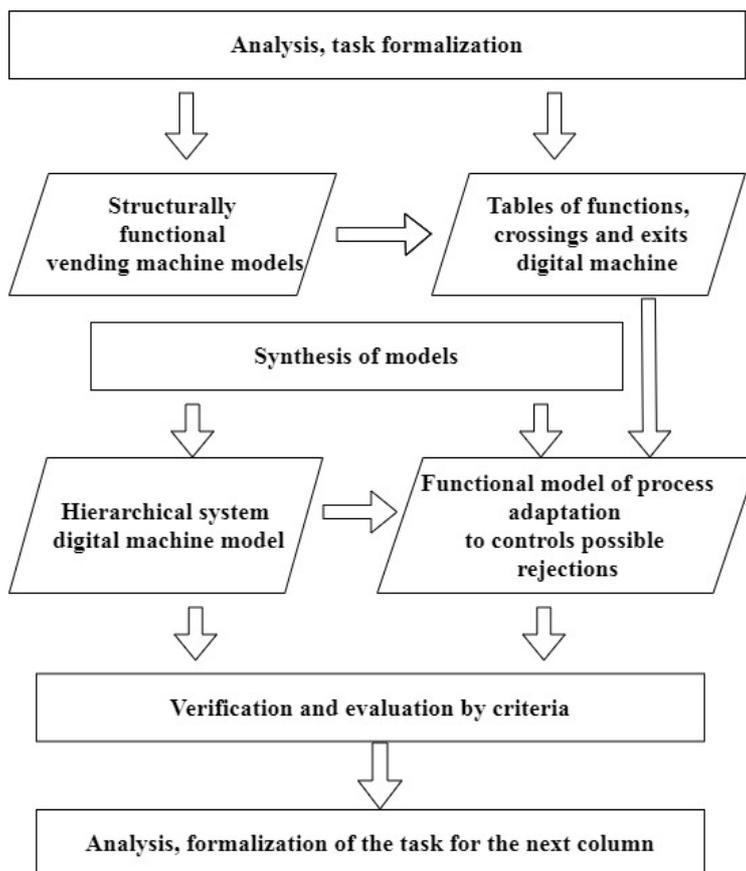


Fig. 4. Algorithm for designing the structural-functional model of AISOMP digital automata

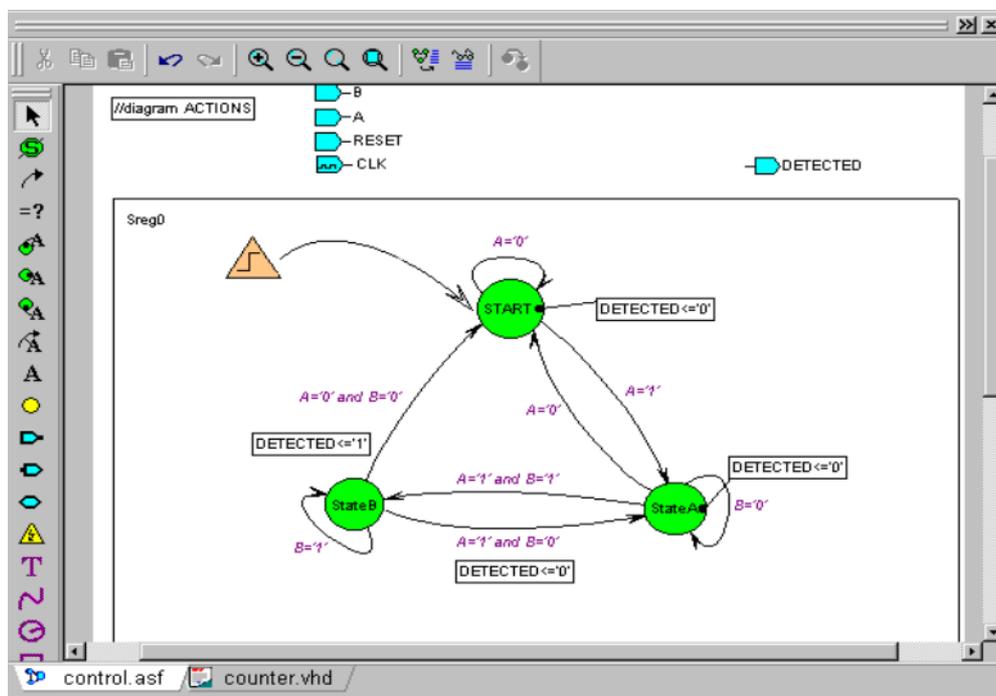


Fig. 5. Example of a digital machine model in Active-HDL environment

Using the State Diagram Editor allows you to automate the formation of HDL-code of the project, to verify it and select a promising control system.

The incoming signal in the model of the AISPPPZ refinery digital automatic machine will pass through 4 stages before starting one of the systems to localize a fire or an accident. The synthesis of the digital automatic machine is divided into four stages (Fig. 6). They are called conditionally:

- (a) The stage of block synthesis of the automatic machine – it is divided into separate blocks;
- b) stage of abstract synthesis – the amount of memory consumed for the given block is determined;
- c) the stage of structural synthesis, when there is a choice of logical and memory elements for building a block;
- d) the stage of synthesis reliability – the conversion and addition of the schemes built to provide reliability is performed [8, 9].

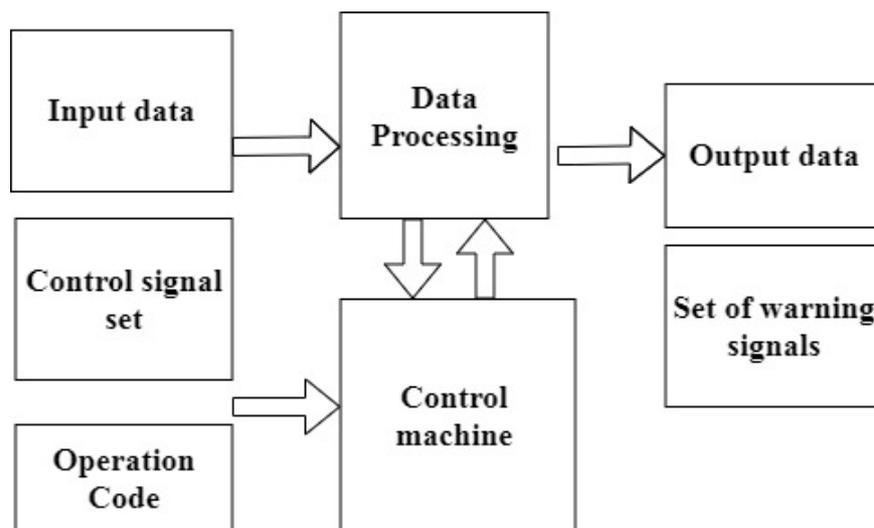


Fig. 6. CA model

Let's consider the model of CA AISOMP Refinery without taking into account the mechanics of this system. The device can be in several states:

- 1) C1 – AISOMP in the open state;
- 2) C2 – AISOMP in working process at signal transfer on AISOMP;
- 3) C3 – AISOMP in the open state after receiving the fire signal;
- 4) C4 – AISOMP is off.

Signals sent to the device: a signal about the flame (a1), a signal about the safe flame (technological process, for example, burning parts) (a0), a signal about dangerous fire (a2), a signal about the emergency situation (a3), a signal about security violation (a4), a signal about returning to the previous state (a5) [10–12].

The initial state is C2. If a flame occurs, the system will respond and signal a1, the state will change to C3. After identifying a fire as a fire, the system must change to the previous state with signal a2. In the case of a safe fire that does not need to be localized and the fire extinguishing system is started, the signal a0 will not change the state.

This device is connected to the general system of the enterprise and, in case of emergency, the signal will go to the AISP and AISE system to notify the refinery employees. In order to do so, the device must receive an a3 signal, and therefore the C2 status will be replaced by the C1 status. To ensure information protection of the refinery in case of arson, signal a4 should be sent to the unit. It will transfer the system from state C2 to state C4. The refinery security will have a5 signal, which will change state C1/C4 to C2. For illustration let's consider the described examples in the form of graphs, in which the points “C” are the system state, arc “a” – transitions from these states (Fig. 7).

The problem of synthesis of the digital automatic machine for AISPPPZ arises because there is no ready standard integrated circuit suitable for unity of work of AISPPPZ refinery and reliability and simplicity of algorithm of work of model CA AISOMP solves this question. The model of the digital automatic machine for AISPPPZ refinery will be constructed of separate standard integrated schemes in Active-HDL program. As the whole AISPPPZ system is complex, there is a necessity to create several CA algorithms which will work in one system [13–15].

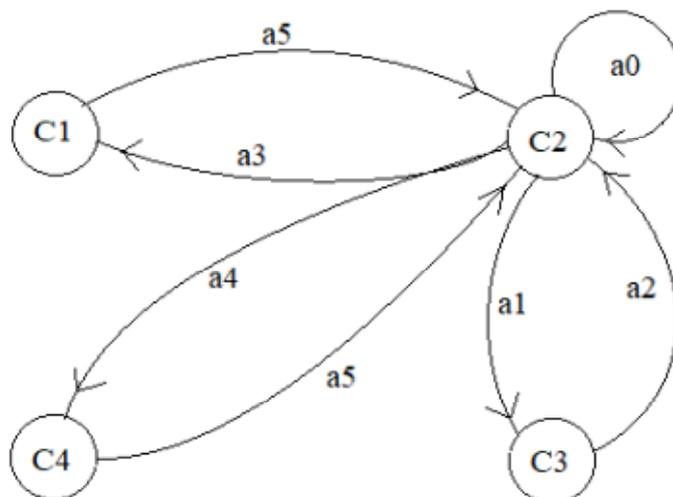


Fig. 7. The graph of CA AISOMP model states

Conclusion

Integration of the system based on the digital automat model will minimize and eliminate errors in the operation of the AFPZ. The advantage of the described model of the digital automatic machine is that it makes it possible to determine the required number of input signal states corresponding to control and monitoring operations. The developed technology makes it possible to process the incoming signal contained in cyclograms into an intermediate form for synthesis of digital automata using innovative tools.

References

1. Topolskiy N.G. [Problems and Principles of Creation of the Integrated Safety and Life Support Systems]. *Proceedings of the fourth international conference "Informatization of safety systems"*, 1995, pp. 14–17. (in Russ.)
2. Kozlitsin A.M., Yakovlev B.N. *Chrezvychaynyye situatsii tekhnogennogo kharaktera. Prognozirovaniye i otsenka. Determinirovannyye metody kolichestvennoy otsenki opasnostey tekhnosfery* [Technogenic Emergencies. Prediction and Estimation. Determined Methods of Quantitative Assessment of Technosphere Hazards]. Saratov, Saratov State University, 2000. 124 p.
3. *Entsiklopediya bezopasnosti* [Encyclopedia of Safety]. Available at: <http://protivpozhara.ru/topologija/teorija/pozhary-i-vzryvy-na-vzryvopozharoopasnyx-obektax> (accessed 01.03.2020).
4. Kotlyarovskiy V.A., Zabegaev A.V. *Avarii i katastrofy. Preduprezhdeniye i likvidatsiya posledstviy* [Accidents and Catastrophes. Prevention and Liquidation of Consequences]. Moscow, Publishing House of ASV, 1998. 416 p.
5. *RD 03–418–01. Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu analiza riska opasnykh proizvodstvennykh ob'yektov* [Methodical Guidelines for Risk Analysis of Hazardous Industrial Facilities]. Moscow, 2001. 25 p.
6. Prusenko B.E., Martyniuk V.F. *Analiz avariyy i neschastnykh sluchayev v neftegazovom komplekse Rossii* [Analysis of Accidents and Accidents in Oil and Gas Complex of Russia]. Moscow, Hazard Analysis LLC, 2002. 309 p.
7. *CHP na neftepererabatyvayushchikh zavodakh v Rossii v 2008-2013 gg* [PE at Oil Refineries in Russia in 2008–2013]. Available at: <https://ria.ru/spravka/20130822/957868347.html> (accessed 01.03.2020).
8. Zyubin V.E. *Programmirovaniye informatsionno-upravlyayushchikh sistem na osnove konechnykh avtomatov* [Programming of Information and Control Systems on the Basis of Finite Automata]. Novosibirsk, Novosibirsk State University, 2006. 96 p.
9. Shalyto A.A. [Automatic Programming]. *Computer sciences and information technologies: theses of reports of International scientific conf. of memory of Prof. A.M. Bogomolov*, 2007.

10. Martinov G.M., Kozak N.V., Nezhmetdinov R.A. Implementation of Control for Peripheral Machine Equipment Based on the External Soft PLC Integrated with CNC. *International Conference on Industrial Engineering. – Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2017, p. 1–4.

11. Schaefer J., Polzin N., Sauter T., Dzierzawa G., Jung J., Kuehner B. 00 Système d'entraînement à l'emploi de l'ordinateur [*Komp'yuternaya sistema obucheniya*]. Patent EP 0690426 (A2), publ. 03.01.1996, G09B 19.

12. Cadossi R., Marazzi D. Contact detecting and signaling device [*Ustroystvo obnaruzheniya i signal'noye ustroystvo*]. Patent EP 1111966 A, publ. 27.06.2001, Signaling Device, G08B 5/00.

13. Martinova L.I., Kozak N.V., Nezhmetdinov R.A. The Russian Multi-functional CNC System AxiOMA Control: Practical Aspects of Application *Automation and Remote control*, 2015, vol. 76, no. 1, p. 179–186.

14. Martinov G.M., Nezhmetdinov R.A., Kuliev A.U. Approach to Implementing Hardware-Independent Automatic Control Systems of Lathes and Lathe-milling CNC Machines. *Russian Aeronautics*, 2016, vol.59, no. 2, pp. 293–296.

15. Mori Masahiko, Fujishima Makoto, Oda Yohei. 5 Axis Mill Turn and Hybrid Machining for Advanced Application. *Procedia CIRP 1*, 2012, pp. 22–27. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.004

Received 25 April 2020

УДК 519.713

DOI: 10.14529/ctcr200304

ИНТЕГРИРОВАНИЕ СИСТЕМ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО АВТОМАТА

К.М. Волкова

Академия государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Россия

Развитие нефтеперерабатывающих заводов увеличивает количество и масштабы пожаров и аварий, которые наносят ущерб как самим объектам, так и окружающим зданиям и сооружениям, жизням и здоровью людей, окружающей среде. Именно поэтому повышение уровня систем противопожарной защиты НПЗ остается одной из важнейших составных частей обеспечения защиты населения от угроз техногенного характера.

В статье приводятся результаты анализа аварий и пожаров на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) за 2015–2019 гг. Рассмотрен вопрос необходимости интегрирования системы противопожарной защиты на НПЗ. В статье изложен процесс создания и функционирования автоматизированной интегрированной системы управления противопожарной защитой (АИСУПЗ). Данная система является новым подходом к решению вопроса безопасности промышленных объектов нефтеперерабатывающей отрасли. Описывается создание новой модели системы противопожарной защиты на основе цифрового автомата. В статье рассматривается схема обобщенной структуры цифрового автомата и граф цифрового автомата автоматизированной интегрированной системы обнаружения и мониторинга пожара.

Разработанная технология дает возможность обработки поступающего сигнала, содержащегося на циклограммах, в промежуточную форму для синтеза цифровых автоматов при помощи инновационных инструментальных средств.

Ключевые слова: противопожарная защита, автоматизированная система управления, цифровой автомат, система обнаружения и мониторинга.

Литература

1. Топольский, Н.Г. Проблемы и принципы создания интегрированных систем безопасности и жизнеобеспечения / Н.Г. Топольский // *Материалы четвертой международной конференции «Информатизация систем безопасности» – ИСБ-95.* – М.: ВИПТШ МВД РФ, 1995. – С. 14–17.

2. Козлитин, А.М. Чрезвычайные ситуации техногенного характера. Прогнозирование и оценка. Детерминированные методы количественной оценки опасностей техносферы: учебное пособие / А.М. Козлитин, Б.Н. Яковлев; под ред. А.И. Попова. – Саратов: Саратов. гос. ун-т, 2000. – 124 с.
3. Против пожара: энциклопедия безопасности. – <http://protivpozhara.ru/tipologija/teorija/pozhary-i-vzryvy-na-vzryvopozharnykh-obektax>.
4. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: учеб. пособие. Книга 3. / под ред. В.А. Котляревского, А.В. Забегаева. – М.: Изд-во АСВ, 1998 – 416 с.
5. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов: РД 03-418-01. – введ. 01.10.2001. – М.: 2001. – 25 с.
6. Прусенко Б.Е. Анализ аварий и несчастных случаев в нефтегазовом комплексе России: учебное пособие / Б.Е. Прусенко, В.Ф. Мартынюк; под ред. Б.Е. Прусенко, В.Ф. Мартынюка. – М.: ООО «Анализ опасностей», 2002. – 309 с.
7. ЧП на нефтеперерабатывающих заводах в России в 2008–2013 гг. // РИА новости. Россия сегодня. – <https://ria.ru/spravka/20130822/957868347.html>.
8. Зюбин, В.Е. Программирование информационно-управляющих систем на основе конечных автоматов: учеб.-метод. пособие / В.Е. Зюбин. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2006. – 96 с.
9. Шалыто, А.А. Автоматное программирование / А.А. Шалыто // Компьютерные науки и информационные технологии: тезисы докладов Междунар. науч. конф. памяти проф. А.М. Богомолова. – Саратов: Саратовский государственный университет, 2007.
10. Martinov, G.M. Implementation of Control for Peripheral Machine Equipment Based on the External Soft PLC Integrated with CNC / G.M. Martinov, N.V. Kozak, R.A. Nezhmetdinov // 2017 International Conference on Industrial Engineering. – Applications and Manufacturing (ICIEAM), 16–19 May. – 2017. – P. 1–4.
11. Patent EP 0690426 (A2), kl. G09B 19/00. Système d'entraînement à l'emploi de l'ordinateur / J. Schaefer, N. Polzin, T. Sauter, G. Dzierzawa, J. Jung, B. Kuehner. – 03.01.1996.
12. Patent EP 1111966 A, G08B 5/00. Signaling Device / R. Cadossi, D. Marazzi. – 27.06.2001.
13. Martinova, L.I. The Russian multi-functional CNC system AxiOMA control: Practical aspects of application / L.I. Martinova, N.V. Kozak, R.A. Nezhmetdinov // Automation and remote control. – 2015. – Vol. 76, no. 1. – P. 179–186.
14. Martinov, G.M. Approach to implementing hardware-independent automatic control systems of lathes and lathe-milling CNC machines / G.M. Martinov, R.A. Nezhmetdinov, A.U. Kuliev // Izv. Vuz. Av. Tekhnika. – 2016. – No. 2. – P. 128–131.
15. Mori, M. 5 axis mill turn and hybrid machining for advanced application / M. Mori, M. Fujishima, O. Yohei // Procedia CIRP. – 2012. – Vol. 1. – P. 22–27.

Волкова Ксения Михайловна, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, Академия государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва; ksenifire@bk.ru.

Поступила в редакцию 25 апреля 2020 г.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Volkova, K.M. Integration of Fire Protection Systems Based on the Digital Automatic Model / K.M. Volkova // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 39–46. DOI: 10.14529/ctcr200304

FOR CITATION

Volkova K.M. Integration of Fire Protection Systems Based on the Digital Automatic Model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 39–46. DOI: 10.14529/ctcr200304

Инфокоммуникационные технологии и системы

УДК 004.4

DOI: 10.14529/ctcr200305

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ИНФОРМАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ ПРЕДПРИЯТИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ И УЧЕБНЫХ ПРОЦЕССАХ С УЧЕТОМ ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНЫХ И ВРЕМЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ БАЗОВОЙ КАФЕДРЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ)

А.Ю. Сапожников¹, А.А. Кузнецов¹, А.С. Маврина¹, Г.Г. Куликов²

¹Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия,

²АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», г. Уфа, Россия

Введение. В настоящий момент при реализации проектов по разработке и производству высокотехнологичной продукции разработчики работают в кооперации. В рамках таких проектов создаются цифровые платформы, позволяющие снизить транзакционные издержки за счет модернизации и алгоритмизации бизнес-процессов. Применение двойника предметно-ориентированной платформы в корпоративной информационной системе университета позволит модернизировать его учебные программы, а также повысить эффективность подготовки студентов. **Цель исследования.** Рассмотреть системную модель трансформации процесса обучения с использованием цифрового двойника информационной платформы, позволяющей решать актуальные задачи в заданной предметной области. Разработать методику применения функционально-стоимостного анализа при учете заданных ограничений на располагаемые проектные ресурсы, включая временные.

Методы исследования, использованные в работе:

- принципы методологии системной инженерии (процессного подхода, жизненного цикла и др.);
- комплексный подход и структурный анализ процесса проектирования по методологии SADT (Structured Analyze and Design Technology);
- функциональное моделирование (в нотации IDEF0).

Результаты. Предложен метод определения ресурсных ограничений, включая временные, на основе функционально-стоимостного анализа (ФСА) по моделям процессов в исследуемой предметной области с использованием информационной платформы.

Предложен модульный подход, основанный на логике прямого и обратного отношений композиции – декомпозиции, путем выделения элементарных объектов исследуемой предметной области по правилам дифференциально-интегрального исчисления (определённых и неопределённых интегралов) и далее теории динамических систем. Подход демонстрируется на решении задачи формирования учебных программ по дисциплинам базовой кафедры «Информационные технологии в машиностроении», связанных с производственной деятельностью. Показано, что применение предложенного подхода позволяет формализовать противоречия в компетенциях студентов с требованиями работодателей и определить компромиссные решения для их устранения.

Заключение. Разработанный подход системного функционального моделирования на основе цифрового двойника платформы предметно-ориентированной области позволяет произвести количественную оценку трудозатрат при ресурсных ограничениях, включая временные.

Ключевые слова: предметно-ориентированная область, системное моделирование бизнес-процессов, информационная платформа, PLM-система, функционально-стоимостной анализ, создание рабочего процесса, базовая кафедра.

Инфокоммуникационные технологии и системы

Мировое развитие цифровизации в различных областях деятельности общества, в том числе в промышленности, уже создало необходимые условия для реализации концепции 4-й промышленной революции INDUSTRY 4 [1]. В этих условиях актуальной является задача формализации прикладных знаний на основе модельной гипотезы. Это приводит к необходимости интеграции деятельности вузов, ОКБ и производственных площадок на основе лучших практик, опыта в виде системных моделей, включая цифровые двойники и IT-технологии [2–4]. Развитие в университетах механизма базовых (производственных) кафедр, ориентация их программ на использование передовых технологий конкретного предприятия отрасли приводит к актуальной задаче: организации в университете площадки инновационной обучающей и научно-производственной деятельности в виде цифрового двойника (ЦД) корпоративной информационной системы (КИС) предприятия [5–9].

КИС предприятия (со своим внешним и внутренним содержанием) – это прежде всего множество интегрированных между собой систем различных классов (PLM/CAD/CAM/CAE/PDM/ERP/SRM/IC др.). Цифровой (информационный) двойник как адекватное отображение объектов и их связей в исследуемой предметно-ориентированной области в соответствии с принципом двойственности, в свою очередь, параллельно отображается структурой внешней среды и структурой внутреннего содержания. Организация по созданию ЦД КИС подробно рассмотрена авторами в [10].

На рис. 1 показана схема расположения цифрового двойника КИС производственного предприятия в структуре вуза и роль базовой кафедры информационных технологий.

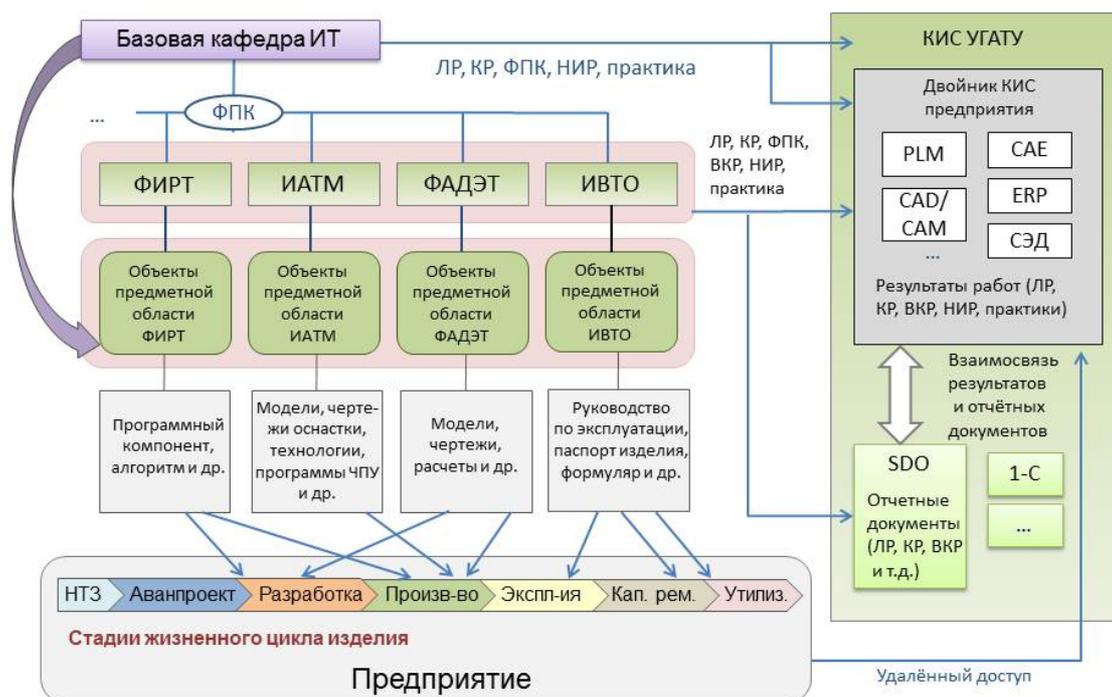


Рис. 1. Место ЦД КИС предприятия в составе КИС университета
Fig. 1. Place of the digital twin of the enterprise's corporate information system within the corporate information system of the university

Выделим внутреннее содержание ЦД КИС как представляемое описанием бизнес-процессов, связанных с обучением на базовой кафедре, а отношения ЦД КИС с КИС университета (внешнее содержание), описываемое интегральными бизнес-процессами взаимодействия факультетов между собой, с базовой кафедрой, с производственным предприятием.

Внедрение передовых технологий в учебный процесс происходит за счёт разработки учебных программ специалистами базовой кафедры, устраняющих разрыв между компетенциями выпускников вуза и требованиями производства (будущего работодателя) за счет адаптации учебных программ под решение актуальных задач предприятия.

Каждая из актуальных задач из предметной области соответствует определенному этапу жизненного цикла (ЖЦ) изделия [11, 12]. Их решением в университете занимаются соответствующие рабочие группы (ППС, научно-исследовательские лаборатории и т. д.). Описание задач на естественном языке открывает возможность дальнейшей формализации и представления знаний в форме онтологической модели, в форме справочников и организационно-распорядительных документов и далее в форме системной модели на предметно-ориентированных метаязыках IDEF, UML, BPMN [13–15].

На рис. 2 представлен фрагмент функциональной модели, где показано влияние актуальных производственных задач на составление индивидуальной траектории обучения. Основными управляющими воздействиями при этом являются профстандарты, описывающие компетенции к конкретным должностям, дополненные требованиями с точки зрения конкретного предприятия, а также федеральные государственные образовательные стандарты, определяющие компетенции специальностей в университете, с учётом его научно-производственной деятельности.

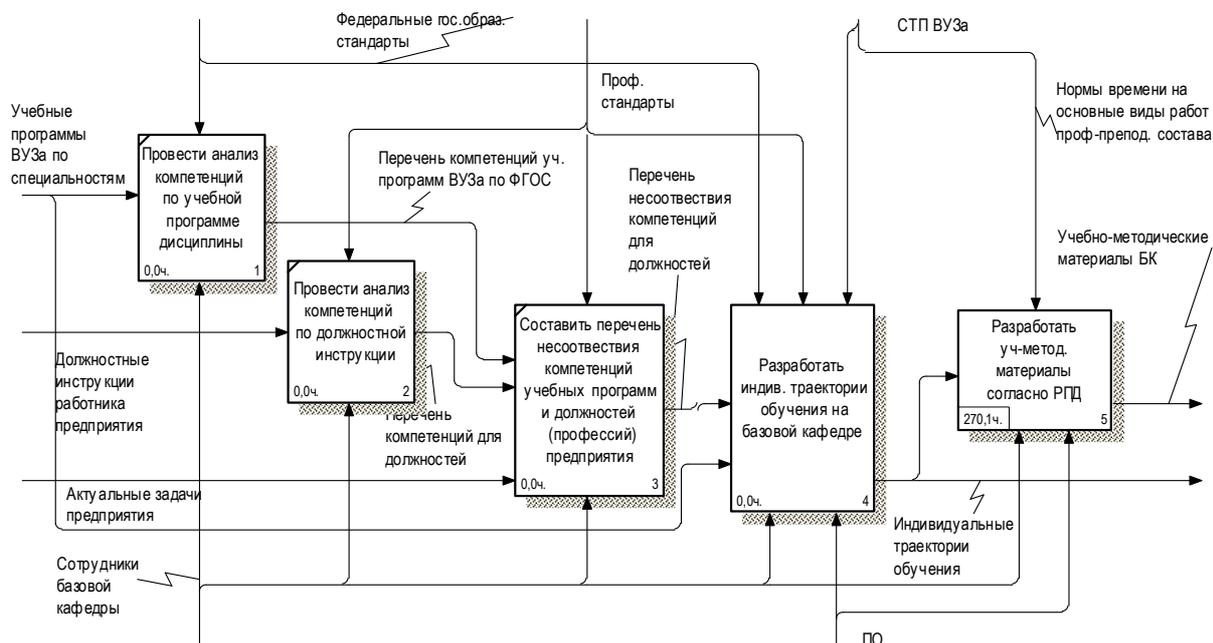


Рис. 2. Фрагмент функциональной модели (2-й уровень)
Fig. 2. Fragment of the functional model (2nd level)

На практике учебные программы базовой кафедры ограничены объёмом часов, выделяемым на вариативные дисциплины. Поэтому для построения гибкой траектории обучения целесообразно применять модульный подход к составлению учебных программ [16]. На рис. 3 приведено влияние (обратная связь) предприятия на учебный процесс университета в виде включения дисциплин базовой кафедры в учебный план. Отметим, что наличие обратной связи предполагает сохранение устойчивости объекта, то есть его целостности в рамках заданных ограничений [17].

Суть данного подхода отражена в таблице, из которой видно, что один и тот же модуль может применяться при подготовке учащихся разных специальностей и с различных факультетов, обеспечивающих в целом весь ЖЦ изделия. ИТ_і и АД_і обозначают модули учебной программы для студентов, обучающихся по специальностям в области информационных технологий и авиационных двигателей соответственно.

Структурным элементом каждого модуля является тема занятия, направленная на приобретение студентом набора контролируемых действий при решении актуальных задач предметной области.

Как правило, на первом этапе внедрения оцениваются временные показатели внедрения бизнес-процессов [18]. Поэтому разработанная модель использовалась для расчёта временных затрат при создании учебно-методических материалов модуля по методике функционально-

Инфокоммуникационные технологии и системы

стоимостного анализа [19, 20]. На рис. 4 приведен фрагмент модели для расчета модуля АД₁ «Базовый курс моделирования в CAD/CAM-системе», трудоемкость которого составила 270,1 ч.

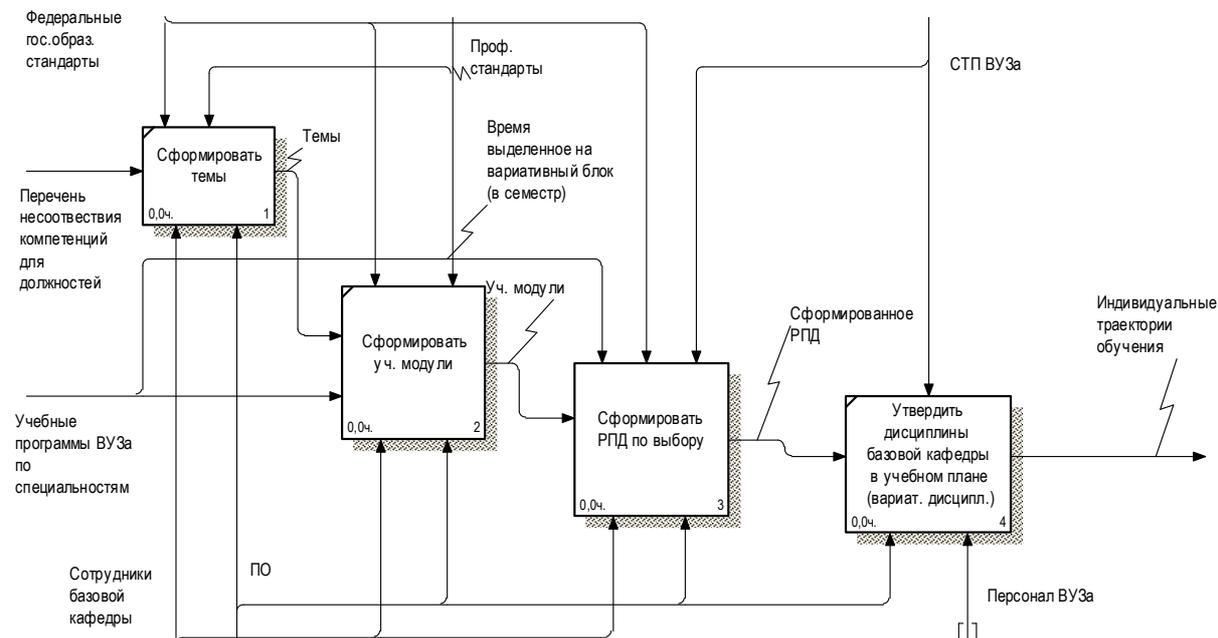


Рис. 3. Фрагмент функциональной модели (3-й уровень)
Fig. 3. Fragment of the functional model (3rd level)

Модульный состав учебных программ The modular structure of training programs

№	Должность (профессия)	Учебная программа	Наименование модуля	Специальность
1.	Системный администратор	Основы администрирования CAD/CAM/PLM-систем	ИТ ₂ – «Основы администрирования CAD/CAM-систем»	Информатика и вычислительная техника
			ИТ ₃ – «Основы администрирования PLM-систем»	
			ИТ ₁ – «Основы управления конфигурацией изделия в PLM-системе»	
2.	Инженер-программист	Основы программирования под CAD/CAM/CAE/PLM-системы	ИТ ₄ – «Развертывание PLM-системы»	Прикладная информатика
			ИТ ₅ – «Разработка прикладного ПО в PLM-системе»	
3.	Инженер-конструктор (проектировщик)	Основы конструкторской подготовки производства	АД ₁ – «Базовый курс моделирования в CAD/CAM-системе»	Двигатели летательных аппаратов; проектирование авиационных двигателей.
			АД ₂ – «Модуль Drafting в CAD/CAM-системе. Базовый курс»	
			ИТ ₁ – «Основы управления конфигурацией изделия в PLM-системе»	
4.	Инженер-конструктор (расчетчик)	Основы инженерного анализа в CAD/CAM/CAE-системе	АД ₁ – «Базовый курс моделирования в CAD/CAM-системе»	Проектирование авиационных двигателей.
			АД ₃ – «Базовый курс инженерного анализа в CAE-системе»	

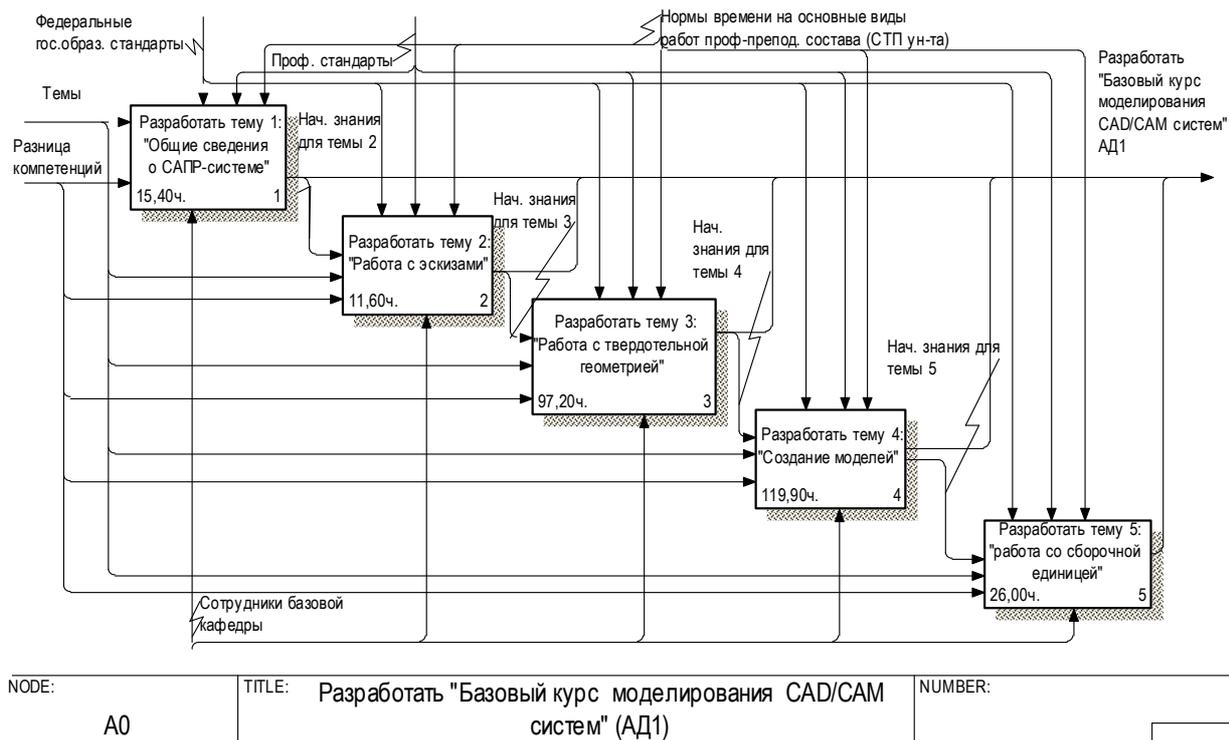


Рис. 4. Расчет временных затрат по методике ФСА для дисциплины «Базовый курс моделирования в CAD/CAM-системе»
Fig. 4. Calculation of time costs using the method of functional cost analysis for the discipline “Basic course of modeling in CAD / CAM-system”

Нормирование времени для отдельных видов задач (рис. 5) производилось по стандарту университета (СТП).

Activity Name	Activity Cost (\$ U.S.)	Cost Center	Cost Center Cost (\$ U.S.)
Разработать учебные программы базовой кафедры для специальностей	404,10	Подготовка и изготовление видеоматериала	51,50
		Подготовка и изготовление уч. презентаций (слайдов)	60,00
		Подготовка лекционного материала	35,00
		Подготовка типовых заданий для практических занятий	2,60
		Разработка индивидуальных учебных планов	10,00
		Разработка методических указаний	105,00
		Составление новых методических указаний по практическим занятиям	90,00
		Составление рабочих программ на учебным дисциплинам	50,00
Сформировать темы для уч. модулей	10,00	Разработка индивидуальных учебных планов	10,00
		Определить уч. модули для спец-й	108,50
Определить уч. модули для спец-й	108,50	Подготовка и изготовление видеоматериала	51,50
		Подготовка и изготовление уч. презентаций (слайдов)	50,00
		Подготовка лекционного материала	5,00
		Подготовка типовых заданий для практических занятий	2,00
Сформировать РПД	50,00	Составление рабочих программ на учебным дисциплинам	50,00

Рис. 5. Фрагмент отчета Activity Cost Report
Fig. 5. Fragment of the Activity Cost Report

Ниже приведены формулы суммирования затрат для рабочей программы дисциплины (РПД) с различными размерностями по схеме композиции (снизу вверх).

$$\text{РПД}_p = \sum_{i=1}^n M_i,$$

где РПД_p – время на разработку p -й РПД; n – количество новых модулей в РПД $_p$; M_i – время на разработку i -го модуля.

$$M_i = \sum_{k=1}^m t_k,$$

где t_k – время на разработку k -й темы; m – количество тем в модуле.

$$t_k = \sum_{i=1}^q N_i * V_i,$$

где V_i – объем i -го вида работ в данной теме; q – количество видов работ при разработке темы; N_i – норма времени для расчета нагрузки, соответствующая i -му виду работ.

При разработке лекционного материала (презентаций), видеоматериалов и заданий для практических занятий, а также учебно-методических указаний для проведения лабораторных работ по данной дисциплине согласно расчетам затраты составили 258 часов, что согласуется с результатами ФСА.

Кроме количественной оценки трудозатрат данный анализ позволяет выполнить планирование работ и распределение нагрузки между сотрудниками базовой кафедры.

В целях обобщения подчеркнем, что в рассмотренном примере были использованы только программные средства, методические и информационные ресурсы, используемые в рамках цифрового двойника КИС предприятия.

Выводы

1. С учётом ограничений на трудозатраты на разработку учебных программ и выпуск учебно-методических материалов предметной области можно обеспечить модульное построение учебных программ вовлечения студентов различных факультетов, получения знаний и компетенций, соответствующих определенной специализации.

2. На основе разработанной функциональной модели были сформированы учебные программы базовой кафедры «ИТ в машиностроении» при ПАО «ОДК-УМПО» для отдельных специальностей факультетов ИРТ и АДЭТ УГАТУ.

3. Трудозатраты, рассчитанные по разработанной модели с использованием методики ФСА, соответствуют реально затраченному, что подтверждает целесообразность ее использования.

Литература

1. Kuznecov, A.A. Example of PLM-system adoption at PJSC «UEC-UMPO» In the network of interaction on the project PD-14 / A.A. Kuznecov, A.S. Mavrina, A.Yu. Sapozhnikov // International scientific journal «Industry 4.0». Bulgaria. – 2018. – Iss. 5. – P. 259–261. – ISSN 2534-997X (Online), ISSN 2534-8582 (Print).

2. Организация виртуальной информационной площадки «Машиностроительное предприятие – технический университет» на примере автоматизации процесса подготовки молодых специалистов / Г.Г. Куликов, И.А. Кривошеев, А.Ю. Сапожников, А.А. Кузнецов; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Уфа: РИК УГАТУ, 2019. – С. 434–440.

3. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов, К.В. Кукушкин и др. // Вестник Восточно-Сибирской открытой академии. – 2019. – № 32. – С. 1–39.

4. Официальный сайт Siemens. – <https://new.siemens.com/global/en/company/stories/research-technologies/digitaltwin/digital-twin.html> (дата обращения: 08.06.2020).

5. Кривошеев, И.А. Разработка методики сквозного обучения студентов УГАТУ в едином информационном пространстве «Вуз – ОКБ – Серийный завод» / И.А. Кривошеев, А.Ю. Сапожников, А.А. Кузнецов // Журнал «Современные проблемы науки и образования». – 2013. – № 5. – <https://science-education.ru/ru/article/view?id=10144> (дата обращения 01.06.2020).

6. Подход к применению концепции цифровых двойников для трансформации корпоративной информационной системы под требования INDUSTRY 4.0 (на примере создания единого

информационного пространства «Вуз – предприятие») / Г.Г. Куликов, А.Ю. Сапожников, А.А. Кузнецов и др. // Вестник УГАТУ. – 2019. – Т. 23, № 4 (86). – С. 154–160.

7. Куликов, Г.Г. Информационно-технологическая модель прикладной цифровой платформы базовой кафедры в наукоемких отраслях промышленности / Г.Г. Куликов, А.Ю. Сапожников, А.А. Кузнецов; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т // Управление экономикой: методы, модели, технологии: материалы XIX Международной научной конференции. – Уфа: РИК УГАТУ, 2019. – С. 282–285.

8. Дронь, Е.А. Разработка функциональных моделей производства при внедрении автоматизированных информационных систем / Е.А. Дронь, Г.И. Погорелов, Г.Г. Куликов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 68–80. DOI: 10.14529/ctcr180308

9. Логиновский, О.В. Применение VI-принципов в гейтовой системе управления проектом создания цифрового двойника ГТД / О.В. Логиновский, К.А. Ризванов, Г.Г. Куликов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 16–26. DOI: 10.14529/ctcr200102

10. Методология проектирования системных моделей рабочих процессов с применением предметно-ориентированных метаязыков / Г.Г. Куликов, А.Ю. Сапожников, А.А. Кузнецов, А.С. Маврина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 45–55.

11. ГОСТ Р 56135–2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2016.

12. ГОСТ Р 53791–2010. Ресурсосбережение. Стадии жизненного цикла изделий производственно-технического назначения. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2018.

13. Калянов, Г.Н. CASE-технологии. Консалтинг в автоматизации бизнес-процессов / Г.Н. Калянов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 320 с.: ил.

14. Имитационное моделирование бизнес-процессов в системе Bizagi Modeler / И.М. Якимов, А.П. Кирпичников, В.В. Мокшин и др. // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 9. – С. 236–239.

15. Метод формального онтологического моделирования и реализации функций системной инженерии на основе принципа достаточного разнообразия структурных связей / В.В. Антонов, А.П. Бельтюков, Г.Г. Куликов, Л.Е. Родионова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 13–26. DOI: 10.14529/ct-cr190402

16. Пискунова, Е.В. Зарубежный опыт реализации инновационных образовательных программ / Е.В. Пискунова // Universum: Вестник Герценовского университета. – 2007. – № 1. – <https://cyberleninka.ru/article/n/zarubezhnyy-opyt-realizatsii-innovatsionnyh-obrazovatelnyh-programm> (дата обращения: 08.06.2020).

17. Антонов, В.В. предметной области с применением инструментов, поддерживающих стандарты / В.В. Антонов, Г.Г. Куликов, Д.В. Антонов // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16, № 3(48). – С. 42–52.

18. Дубинина, Н.А. Показатели оценки бизнес-процессов предприятия / Н.А. Дубинина // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». – 2016. – № 2(29). – С. 179–191.

19. Кузьмина, Е.А. Функционально-стоимостный анализ и метод ABC / Е.А. Кузьмина, А.М. Кузьмин // Методы менеджмента качества. – 2002. – № 12. – С. 6–10.

20. Черемных, С.В. Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии: практикум / С.В. Черемных, И.О. Семенов, В.С. Ручкин. – М.: Финансы и статистика. Серия «Прикладные информационные технологии», 2006. – 192 с.: ил.

Сапожников Алексей Юрьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры ИТ в машиностроении, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; axl_mail_box@mail.ru.

Кузнецов Александр Андреевич, аспирант, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; kuznecovopr@gmail.com.

Маврина Анна Сергеевна, аспирант, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; nytk_a008@mail.ru.

Куликов Геннадий Григорьевич, технический директор, АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», г. Уфа; gennadyg_98@Yahoo.com.

Поступила в редакцию 10 июня 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr200305

APPLICATION OF THE DIGITAL TWIN OF THE ENTERPRISE INFORMATION PLATFORM IN PRODUCTION AND EDUCATIONAL PROCESSES ACCOUNTING FUNCTIONAL, COST AND TIME CONSTRAINTS (ON THE EXAMPLE OF BUSINESS PROCESSES OF THE INFORMATION TECHNOLOGY BASIC CHAIR)

A.Yu. Sapozhnikov¹, axl_mail_box@mail.ru,

A.A. Kuznetsov¹, kuznecovopkr@gmail.com,

A.S. Mavrina¹, nytk_a008@mail.ru,

G.G. Kulikov², gennadyg_98@Yahoo.com

¹Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

²JSC “Ufa scientific-production enterprise “Molniya”, Ufa, Russian Federation

Introduction. Currently, developers work in cooperation in implementing projects for the development and production of high-tech products. Digital platforms are being created for these projects that reduce transaction costs by modernizing and algorithmization business processes. The applying of such a subject-oriented platform of digital twin in the corporate information system of the University allows modernizing its educational programs, as well as improving the efficiency student training. **Aim.** The purpose of the article is to consider a transformation systematic model of the educational process by using the digital twin of an information platform that provides solving actual problems in researched subject area. It is necessary to develop a method for applying ABC-cost accounting the specified restrictions on available project resources, including time. **Materials and methods.** The methods used in the work: the principles of system engineering methodology (process approach, life cycle, etc.); the complex approach and structural analysis of the design process using the SADT methodology (structured analysis and design technology); the functional modeling (in IDEF0 notation). **Results.** It was suggested a method for determining resource constraints including time constraints, based on ABC-cost of process models in the researched subject area using an information platform. A modular approach based on the logic of direct and inverse composition – decomposition relations is proposed. The elementary objects of the researched subject area according to the rules of differential integral calculus (definite and indefinite integrals) and then the theory of dynamical systems were identified. **Conclusion.** The developed approach of system functional modeling based of the platform digital twin of the subject-oriented area provides a quantitative working hour costs including time and resource constraints.

Keywords: subject-oriented area, system modeling of business processes, information platform, PLM-system, ABS-cost, workflow design, basic chair.

References

1. Kuznetsov A.A., Mavrina A.S., Sapozhnikov A.Yu. Example of PLM-system Adoption at PJSC “UEC-UMPO” in the Network of Interaction on the Project PD-14. *International scientific journal “Industry 4.0”*, 2018, no. 5, pp. 259–261.

2. Kulikov G.G., Krivosheev I.A., Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A.A. [Organization of the Virtual Information Platform “Machine-Building Enterprise-Technical University” on the Example of Automation Process of Training Young Specialists]. *Stankostroyeniye i innovatsionnoye mashinostroyeniye. Problemy i tochki rosta: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Machine tool industry and innovative machine building. Problems and growth points: materials of the All-Russian scientific and practical conference]. Ufa, Ufa State Aviation Technical University, 2019, pp. 434–440. (in Russ.)
3. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Kukushkin K.V., Maruseva V.M., Kulemin V.Yu. [Digital Twins and Digital Transformation of Military-Industrial Complex Enterprises]. *Vestnik of the East Siberian Open Academy*, 2019, no. 32, pp. 1–39. (in Russ.)
4. Siemens [Siemens]. Available at: <https://new.siemens.com/global/en/company/stories/research-technologies/digitaltwin/digital-twin.html> (accessed 08.06.2020).
5. Krivosheev I.A., Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A.A. Development of End-to-End Training Method of UGATU Students in UIS “UNIVERSITY-OKB-Serial Plant”. *Journal of Modern problems of science and education*, 2013, no. 5. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=10144> (accessed 01.06.2020) (in Russ.).
6. Kulikov G.G., Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A.A., Mavrina A.S., Zagidullin D.I. [Approach to the Application of the Concept of Digital Twin for the Transformation of the Corporate Information System Using the Requirements of INDUSTRY 4.0 (on the Example of Creating a UIS “UNIVERSITY-enterprise”)]. *Vestnik UGATU*, 2019, vol. 23, no. 4(86), pp. 154–160. (in Russ.)
7. Kulikov G.G., Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A.A. [Information Technology Model of the Applied Digital Platform of the Basic Department in Science-Intensive Industries]. *Upravleniye ekonomikoy: metody, modeli, tekhnologii: materialy XIX Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Economic management: methods, models, technologies: materials of the XIX International scientific conference]. Ufa, Ufa state University. aviation tech. university, 2019. pp. 282–285. (in Russ.)
8. Dron E.A., Pogorelov G.I., Kulikov G.G. [Development of Production Models at Introduction of Automated Information Systems]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 68–80. DOI: 10.14529/ctcr180308. (in Russ.)
9. Loginovskiy O.V., Rizvanov K.A., Kulikov G.G. [Application of BI-Principles in the Gate Project Management System to Create a Digital Twin of the GTE]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 16–26. DOI: 10.14529/ctcr200102. (in Russ.)
10. Kulikov G.G., Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A.A., Mavrina A.S. [Design Methodology System Models of Workflows Using Subject-Oriented Metalanguages]. *Bulletin of the South Ural state University. Series: Computer technologies, automatic control, radio electronics*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 45–55. (in Russ.)
11. GOST R 56135-2014. *Upravleniye zhiznennym tsiklom produktsii voyennogo naznacheniya. Obshchiye polozheniya* [State Standard 56135-2014. Life Cycle Management of Military Products. General Provisions]. Moscow, Standardinform, 2016.
12. GOST R 53791-2010. *Resursosberezheniye. Stadii zhiznennogo tsikla izdeliy proizvodstvenno-tekhnicheskogo naznacheniya. Obshchiye polozheniya* [State Standard 53791-2010. Resource Saving. Stages of the Life Cycle of Products for Industrial and Technical Purposes. General Provisions]. Moscow, Standardinform, 2018.
13. Kalyanov G.N. *CASE-tekhnologii. Konsalting v avtomatizatsii biznes-protsessov* [CASE-technologies. Consulting in business process automation]. Moscow, Hotline-Telecom, 2002. 320 p.
14. Yakimov I.M., Kirpichnikov A.P., Mokshin V.V., Aleutdinova G.R., Paigina L.R. [Simulation of Business Processes in the Bizagi Modeler System]. *Vestnik of the Technological University*, 2015, vol. 18, no. 9, pp. 236–239. (in Russ.)
15. Antonov V.V., Beltyukov A.P., Kulikov G.G., Rodionova L.E. [Formal Representation of the Model of Realization of the Functions of System Engineering Based on the Principle of the Enough Diversity of Structural Connections]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 13–26. DOI: 10.14529/ctcr19040. (in Russ.)

16. Piskunova E.V. [Foreign experience in implementing innovative educational programs]. *Universum: Vestnik of the Herzen University*, 2007, no. 1, pp. 19–21. (in Russ.)
17. Antonov V.V., Kulikov G.G., Antonov D.V. [Formalization of the Subject Area Using of Tools That Support Standards]. *Vestnik UGATU*, 2012, vol. 16, no. 3(48), pp. 42–52. (in Russ.)
18. Dubinina N.A. [Indicators for Evaluating Business Processes of an Enterprise]. *Vestnik of the Perm University. Ser. "Economy"*, 2016, no. 2(29), pp. 179–191. (in Russ.)
19. Kuzmina E.A., Kuzmin A.M. [Functional Cost Analysis and ABC Method]. *Quality Management Methods*, 2002, no. 12, pp. 6–10. (in Russ.)
20. Cheremnykh S.V., Semenov I.O., Ruchkin B.C. *Modelirovaniye i Analiz Sistem. IDEF-Tekhnologii: Praktikum* [Modeling and analysis of systems. IDEF-technologies: practicum]. Moscow, Finance and Statistics, 2006. 192 p.

Received 10 June 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Применение цифрового двойника информационной платформы предприятия в производственных и учебных процессах с учетом функционально-стоимостных и временных ограничений (на примере бизнес-процессов базовой кафедры информационных технологий) / А.Ю. Сапожников, А.А. Кузнецов, А.С. Маврина, Г.Г. Куликов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 47–56. DOI: 10.14529/ctcr200305

FOR CITATION

Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A.A., Mavrina A.S., Kulikov G.G. Application of the digital twin of the enterprise information platform in production and educational processes accounting functional, cost and time constraints (on the example of business processes of the information technology basic chair). *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 47–56. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200305

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

DOI: 10.14529/ctcr200306

ALGORITHMS FOR IN-LINE PRESSURE TRANSMITTERS CONDITION MONITORING

O.Yu. Bushuev, bushuevoi@susu.ru,

E.S. Tugova, tugovaes@susu.ru,

M.A. Motorina, motorina_maria97@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Introduction. In the context of the transition of the world industry to new production technologies, the task of monitoring the technical condition of automatic control systems components, including pressure sensors, is urgent. Despite the existence of research and development aimed at creating systems for diagnostics and self-diagnosis of pressure sensors, the degradation mechanisms of mechanical parts of sensors and diagnostics algorithms during operation remain insufficiently studied.

Aim. Propose algorithms for condition monitoring of the mechanical and hydraulic system of in-line pressure transducers.

Materials and methods. This study is based on tests conducted on pressure modules with defects that simulate the lack of liquid in the separation cavity of the mechanical and hydraulic system of the transducer, manufactured by the industrial partner. The method of fault diagnosis is based on the analysis of statistical characteristics of the ADC signal of the pressure modules.

Results. During the tests, hypotheses were confirmed about the dependence of the standard deviation of the output signal of the pressure module on the volume of liquid-oil in the channel. Based on the obtained data, algorithms for diagnosing the technical condition of the pressure sensor were proposed, which use the values of the sensor signal STD as a diagnostic parameter. The algorithms provide verification of the applicability conditions of the considered method and use additional information about the technological process. The problems that need to be solved for the practical implementation of algorithms in real production are formulated.

Conclusion. The proposed algorithms for condition monitoring of the pressure sensor differ from the known diagnostic algorithms in that they use the results of experimental studies and are aimed at detecting a malfunction of the mechanical part of the sensors. Algorithms can be used to monitor the technical condition of in-line pressure sensors during operation under certain conditions that need to be clarified in the course of further research and field tests.

Keywords: condition monitoring, pressure transducers, fault detection, noise analysis, standard deviation.

Introduction

In the context of the transition of the global industry to new digital and intelligent production technologies, the key is to use a large amount of data that is transmitted and processed digitally. The source of the data, as a rule, are the sensors and other measuring devices. Features of Industry 4.0 include sensor revolution – a mass transition to the use of digital sensors, actuators and automatic control systems [1]. The number of sensors used in various applications of Industry 4.0 is increasing at an enormous rate.

At the same time, the problem is not only an increase in the number of sensors, but also an increase in the requirements for the measurement quality. Since it is assumed to manage all technological objects and processes based on mathematical models and digital data, the increasing challenges of digital condition monitoring of equipment and automation of production processes increase the requirements for the new measurement, control and diagnostics techniques. The development of digital, intelligent produc-

tion technologies leads to an increased need for intelligent sensors of a new type. The growing number of sensors and their integration into automatic control systems requires new approaches to the methods of their metrological maintenance.

Due to the fact that the equipment is subject to break during operation, the task of monitoring its technical condition is relevant, especially at present, in the context of transition to new production technologies. Sensors are key elements of the automatic control system and the reliability of the entire system depends on their reliability.

Many papers describe diagnostics and forecasting of various technical systems, in particular, there are works related to online monitoring of technical condition and self-diagnostics (self-check) of pressure sensors. Various solutions to the problem of increasing the reliability of sensors during operation are proposed, from redundant sensors to the development of new designs of pressure sensors with the function of self-diagnosis or metrological self-check [2–8].

Mass-produced pressure sensors have implemented algorithms for basic diagnostics of their own condition. There are also developments that allow condition monitoring of the technological process based on sensors of physical quantities [9–11]. There are works devoted to the study of possible errors of pressure sensors during operation and their signatures [12–16]. Nevertheless, the mechanisms of degradation of the mechanical parts of sensors and their manifestation in the sensor signals available for monitoring are insufficiently studied [14]. Overcoming this problem is an urgent task for the development of industry.

In this paper, we consider the problem of diagnostics of the technical condition of the mechanical and hydraulic system of an in-line pressure transmitter during operation. The paper suggests ideas for implementing diagnostic algorithms based on tests of pressure transmitters. The result of the study is that in conjunction with the pressure sensor manufacturer, an experimental study of the effect of sensor fill-oil leakage on the characteristics of sensor output signal was conducted. The results obtained will allow to refine the program of research and development work to create a full-fledged system for sensor condition monitoring.

1. A pressure transmitter fault symptoms

In this paper, we have studied in-line gauge pressure transmitters. The mechanical and hydraulic system (MGS) of a pressure transmitter is a part of the sensor that is directly affected by the working medium. The main function of the MGS is to transform the pressure of the working medium into the strain of the measuring membrane of the transmitter. Failure of the system leads to its inability to transmit the pressure of the working medium to the measuring membrane and the sensor becomes inoperable. For example, fill-oil leakage leads to a violation of the mechanical connection between the measured medium and the sensor. The failure of this system is manifested as a lack of technical ability to perform the required function.

The condition of the mechanical and hydraulic system is characterized by its physical parameters – mass, stiffness, geometry, etc. Defects in the mechanical and hydraulic system can lead to its failure, but in general it can perform its function even if minor defects occur, although the conversion function changes and the measurement error increases [12].

It was not intended to make changes to the design of sensors, so it was decided to select a method for sensor condition monitoring based on the output signal noise analysis. A review of the literature and theoretical analysis allowed us to formulate hypotheses that were tested experimentally during tests of faulty pressure modules. A total of 6 normal and 14 faulty pressure modules were tested.

The faulty modules simulating fill-oil leakage were manufactured by the industrial partner. The modules differed in the percentage of remaining liquid – from 53 % to 94 %. The percentage of remaining liquid corresponds to the stage of development of this fault, which allows us to investigate not only the presence of this fault, but also to determine at what stage it can be detected by the proposed method.

The tests were conducted using specialized test facility at SUSU, which allows you to regulate the flow rate of the working medium and its pressure up to 500 kPa. The tests were performed at room temperature. The pressure was controlled using the pressure sensor BD SENSORS DMP 331. The required pressure was set by regulating the actuators – the GRUNDFOS pump and the regulating valve.

According to the test results, all modules were divided into two groups. The first group consists of modules with fill-oil from 53 % to 87 %. The second group consists of modules with fill-oil of 89 % or

more. The behavior of the first group (which can be considered faulty) is distinguished by the minimum value of the standard deviation (STD) of analogue-to-digital converter (ADC) output signal, which is constant with the input pressure, as well as the weak influence of the input pressure on the average value of the ADC codes (when the pressure increases above 100 kPa). The dependence of the average value and the output signal STD for modules with a fill-oil of 83–87 % is shown in fig. 1. For comparison, fig. 1 also shows a dependency graph for the module with a 94 % fill-oil.

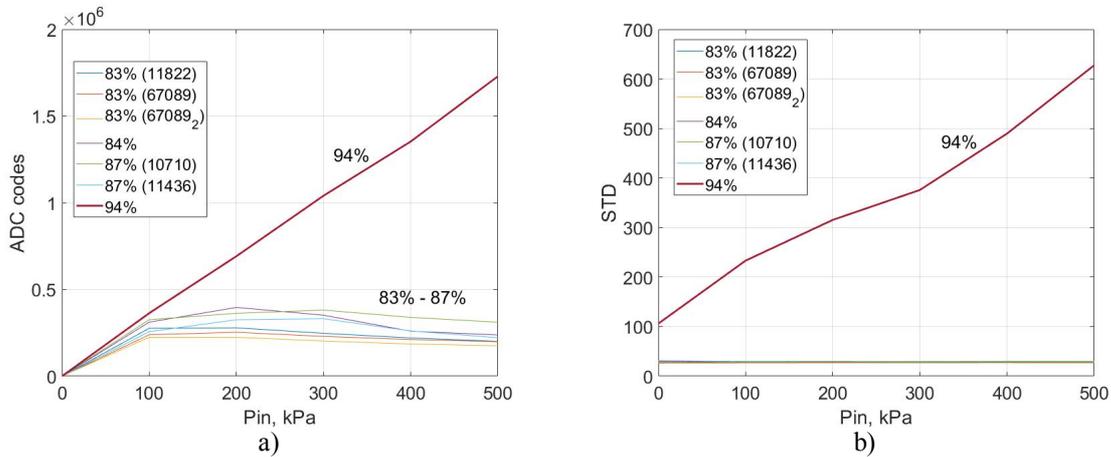


Fig. 1. The dependence of the average value (a) and STD (b) of ADC codes for the first group of faulty modules in comparison with the module with 94 % fill-oil

Fig. 1 shows that the STD of the output signal of faulty modules with fill-oil of 87 % or less does not depend on the input pressure and takes a minimum value approximately equal to the STD value at zero overpressure. For the second group of modules (with fill-oil of 89 % or more), this effect is not observed or is not always observed, and their behavior is indistinguishable from the behavior of healthy modules.

Fig. 2 shows the interval estimates of the STD of the sensor output signal for modules with different fill-oil percentages at an input pressure of 500 kPa, where the vertical value stands for the sample STD estimate with an interval of $\pm 2\sigma$, and the horizontal value stands for the percentage of fill-oil.

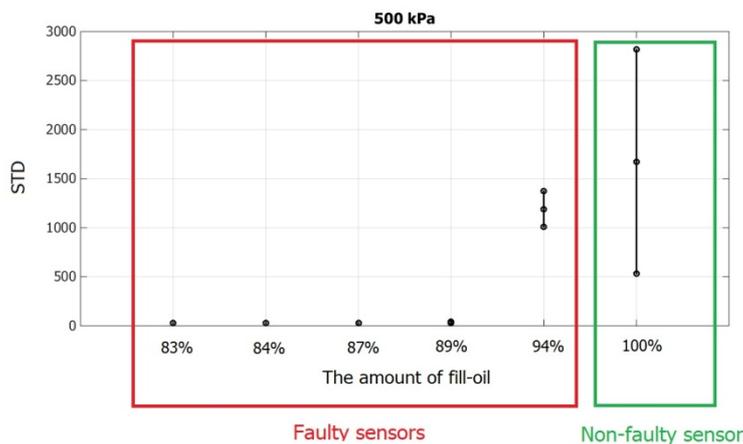


Fig. 2. Graph of STD estimates for pressure modules with different amount of fill-oil

The hypothesis of the dependence of the noise STD on the amount of fill-oil was confirmed. The value of the STD of the output signal from the pressure sensor can act as a diagnostic parameter of the pressure transmitter condition. This value can be used in pressure sensor monitoring systems. The conducted tests confirmed the possibility of using the ADC codes of the sensor as the basis of the method of diagnostics of its technical condition and allow us to offer possible diagnostic algorithms.

2. Algorithms for sensor condition monitoring during operation

Currently, the transition to new production technologies raises the question of the possibility of implementing systems for on-line condition monitoring of sensors, and increasing the calibration interval or completely abandon their scheduled metrological maintenance, as well as more economical ways to preserve or improve the reliability of automatic control systems.

The traditional way to ensure reliability is redundancy. Many important systems have triple redundancy. It is known that for condition monitoring of a pressure sensor only according to its indications, it is necessary to use at least three pressure sensors measuring the same medium under the same conditions [13]. If the readings from one of the sensors differ significantly from the readings from the other two, it can be concluded that this sensor is faulty.

In [14], such a monitoring system is used at nuclear reactors for increased monitoring of indications for an aggressive environment. This type of system uses redundant sensors, which are combined sensors that measure the same process parameter under the same environmental conditions.

Emerson Process Management offers a statistical process monitoring technology [10, 11] that can be used to detect anomalies in the impulse lines of various pressure transducers. This is achieved by using statistical methods to determine the characteristics of the signal received from the sensor and record their changes. This system uses mean and standard deviation values. For example, when impulse lines are plugged, the average value of the measured value remains constant, while the value of STD changes significantly. In this case, the monitoring system informs the operator that a fault has occurred.

The proposed algorithm for diagnosing the technical condition of a pressure transmitter is based on the calculation of the ADC codes STD during the sensor operation and comparing it with the reference value, which can either be pre-set when calibrating the sensor, or set at the beginning of using the sensor in the process. The study shows that in the presence of a sufficiently pronounced fault (the percentage of fill-oil leakage is more than 11 %), the output signal STD level remains at the minimum level and is constant with the input pressure. This suggests that the reference value of the STD can be set together with the zero-offset setting at zero overpressure.

Next, there are two possible ways to implement the algorithm. The first is a simple comparison of the calculated current STD value (for example, for 1 second on 20 conversions) with the minimum reference value. If the difference between the current value and the reference value of a pre-set threshold is exceeded, the message "Pay attention" is displayed. The second variant of the algorithm implementation is memorization of pairs of values (STD, mean) in the training mode for this technological process. In monitoring mode, every two newly calculated values (STD, mean) are compared with the database of values. If for this mean value, the current STD value is significantly less than the value from the database, an error message is returned. The specific numerical values and the details of calculating the reference values depend on the conditions in which the sensor is intended to be used, and must be established through application studies for a specific type of task.

The diagnostic algorithm based on monitoring of STD is similar to the well-known Statistical Process Monitoring (SPM) algorithm implemented in some Rosemount products [11], but it also has some differences. The Statistical Process Monitoring algorithm continuously calculates the mean value of the signal and its STD in the "Monitoring" mode. An alarm signal is triggered if the STD significantly decreases with the mean value unchanged.

If there is a malfunction of the sensor associated with its mechanical and hydraulic system, the correct display of the pressure value will fail, so the mean value will not be unchanged. Accordingly, to implement the function of diagnostics by the sensor of its own condition, it is necessary to update the SPM algorithm, taking into account the knowledge of the nature of the sensor's fault manifestation in its output signal.

In some cases, in order to detect the sensor's failure, it is enough to monitor the value of the signal's STD. But in general, even if the condition for the presence and power of noise is met, the STD may be a necessary but not sufficient indication of a fault. In order to reliably determine the condition of the sensor, additional parameters must be monitored, such as response time or parameters related to the signal spectrum. It is probably possible to take into account the dynamics of the sensor in the form of a time constant of a transient characteristic or other parameter. It is also possible to use information from multiple sensors.

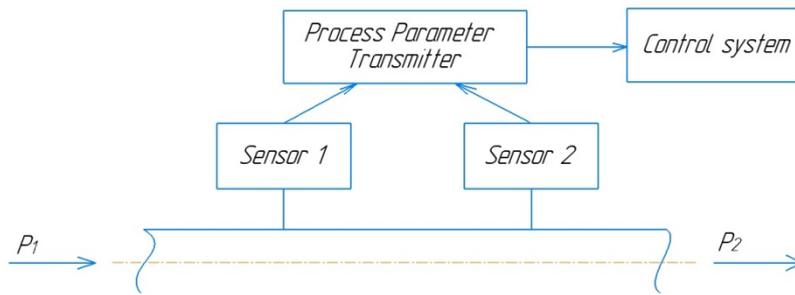


Fig. 3. Diagram of a pressure sensor monitoring system

P_1 – flow pressure at the pipe inlet, P_2 – flow pressure at the pipe outlet (subject to restrictions: P_1 is approximately equal to P_2), two pressure sensors and a transmitter of process variables that sends data to the control system. Fig. 4 shows the flowchart of the condition monitoring algorithm.

It is possible to suggest a practical implementation of the system for condition monitoring of a pressure transmitter on the pipe section using the readings of two sensors and the values of the output signal STD. The scheme of practical implementation of this algorithm is shown in fig. 3.

The scheme consists of a pipe section with flow parameters

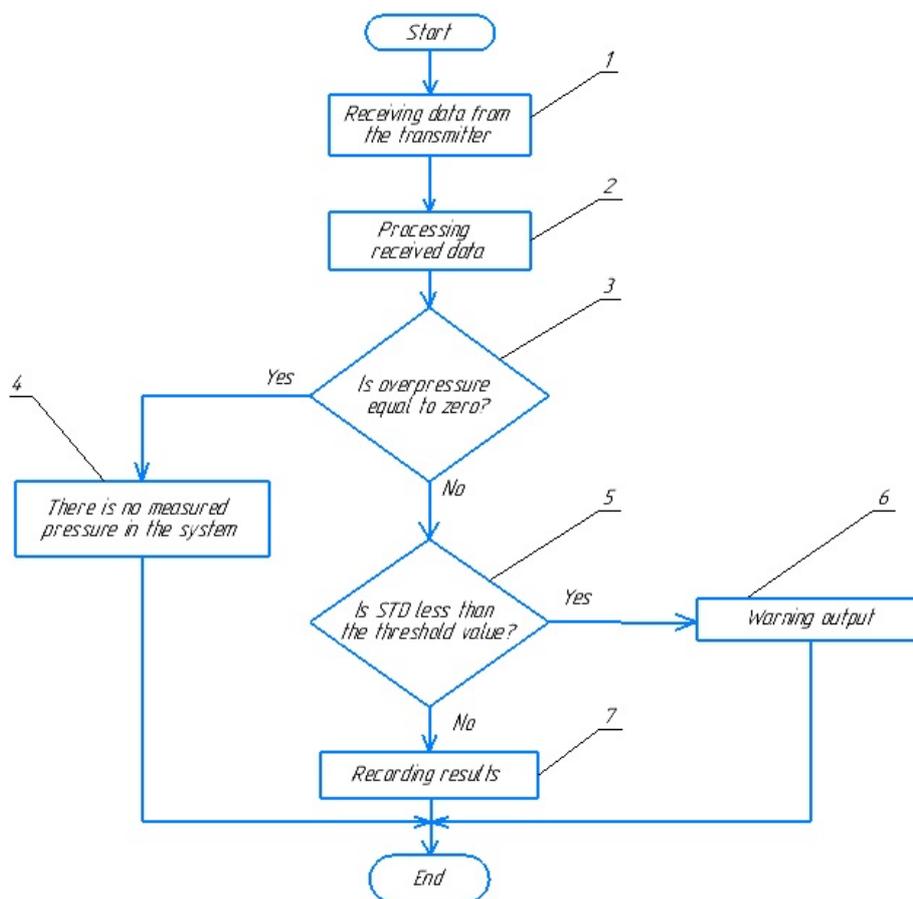


Fig. 4. Flowchart of a pressure sensor condition monitoring algorithm based on the readings of two sensors

The condition monitoring algorithm shown in fig. 4 includes a sequential set of actions. In block 1, process and variable data are obtained from pressure sensors. Further, the block 2 is the main data processing that allows you to check limitations of the method (block 3), and calculate the reference values of STD for which we can conclude about the sensor error. In block 3, data from both sensors can be taken into account. Block 5 compares the calculated values of the standard deviation with a reference value, which can either be pre-set during calibration of the sensor or calculated at the beginning of the use of sensor technology process. The final stage of the algorithm is block 7, which generates the output.

3. Applicability and limitations of diagnostic algorithms

There are limitations and conditions for the applicability of the method considered, as well as questions that have not yet been investigated or have not been finally resolved within the framework of the study. The main condition for the applicability of the method of technical diagnostics of the pressure sensor based on noise analysis is the presence of technological noise of a sufficient amplitude in the technological process, of which the pressure sensor being diagnosed is a part. Despite the fact that this condition is usually met in a real technological process, noise characteristics, which are generally unknown, can have a significant impact on the diagnostic algorithm.

The very nature of the technological process also affects the possibility of diagnostics. As a diagnostic parameter, STD is not suitable if there is zero overpressure in the process or processes that change rapidly over time. You can overcome this limitation if you use additional sources of information about the process, including data from other sensors (pressure, flow, etc.) installed to monitor the process.

The sufficient level of fault development is also a significant limitation. For failures associated with fill-oil leakage, this parameter is the percentage of liquid outflow from the separation channel. Based on the results of the study, it can be argued that the percentage of fill-oil leakage should be sufficient (more than 10 %) to change the value of the output signal STD so that it can be detected.

Conclusions

In this paper, methods for pressure transmitters condition monitoring are considered. Based on the hypothesis of the dependence of the noise amplitude on the amount of fill-oil in the pressure sensor channel, a possible scheme for condition monitoring in the pipe section is presented. The algorithm for condition monitoring is also considered in stages. This algorithm is implemented on the basis of processing the readings from two pressure sensors and analyzing the noise of the output signal. For practical implementation of algorithms, additional research is required, including the study of the influence of process noise characteristics on the possibility of detecting a fault, the search for symptoms of early development of defects and field trials.

Acknowledgments

The research was carried out with the participation and support of IG METRAN. The authors express their gratitude to the Director of the Global Engineering Center D. Iosifov, head of the pressure sensor electronics Department S. Dubrovin, design engineer A. Krivonogov and other employees of IG METRAN for their assistance in conducting the research. The authors express their gratitude to Professor Manus Henry of Oxford University for the valuable recommendations during the implementation of the project; to A. Shultz, Director of the research and educational center "Aerospace technologies" of SUSU for access to the test stand; to students of the Higher school of electronics and computer science of SUSU, D. Salov and E. Bobkov, for assistance in conducting tests of pressure sensors.

References

1. Knyagin, V.N. *Novaya tekhnologicheskaya revolyutsiya: vyzovy i vozmozhnosti dlya Rossii: ekspertno-analiticheskiy doklad* [New Technological Revolution: Challenges and Opportunities for Russia: Expert-Analytical Report]. Moscow, Center for Strategic Research, 2017. 136 p.
2. Feng Z., Wang Q., Shida K. Design and Implementation of a Self-Validating Pressure Sensor. *IEEE SENSORS JOURNAL*, 2009, vol. 9, no. 3, pp. 207–218.
3. Taymanov R., Sapozhnikova K., Druzhinin I. Sensor Devices with Metrological Self-Check. *Sensors and Transducers*, 2011, vol. 133, no. 10, pp. 30–45.
4. Belozubov E.M., Vasilev V.A., Chernov P.S. Metrological Self-Checking of Smart Sensors of Measurement and Control Systems. *Meas Tech.*, 2018, vol. 61, pp. 660–669.
5. Larionov V.A. [Method for Metrological Self-Monitoring of a Strain Gauge Pressure Sensor]. *Metrology*, 2020, no. 1, pp. 48–68. (in Russ.)
6. Bushuev O., Semenov A.S., Chernavskiy A.O., Shestakov A.L. Detecting Changes in the Condition of a Pressure Transducer by Analyzing its Output Signal. *Proceedings of XX IMEKO World Con-*

gress “Metrology for Green Growth”, Busan, Republic of Korea (September 9–14, 2012), 2012. Available online: <http://www.imeko.org/publications/wc-2012/IMEKO-WC-2012-TC10-P1.pdf>

7. Bushuev O.Yu., Semenov A.S. [An Experimental Study of the Possibility of Diagnosing the State of a Strain Gauge Pressure Transducer Based on an Analysis of its output Signal]. *Bulletin of the South Ural state University. Series: Computer technologies, automatic control, radio electronics*, 2012, vol. 17, no. 35(294), pp. 65–68. (in Russ.)

8. Semenov A.S., Shestakov A.L. [Self-Diagnosis Sensor Model with Non-Linear Conversion Function]. “Sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritelnoy informatsii”: sbornik trudov mezhduнародной nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Shlyandinskie chteniya” [“Means and Technologies of Receiving and Processing from Measuring Information”: collection of works of the international scientific and technical conference “Schlandin Readings”]. Penza, 2014, pp. 142–147. (in Russ.)

9. Eryurek E., Kavaklioglu K. *Pressure Transmitter with Diagnostics*. Patent N 7254518 U.S., appl. 15.03.2004, publ. 07.08.2007.

10. Kavaklioglu K., Wehrs D.L., Lattimer D.R., Eryurek E. *Diagnostics in Industrial Process Control System*. Patent N 7680549 U.S., appl. 04.04.2006, publ. 16.03.2010.

11. Wehrs D. Detection of Plugged Impulse Lines Using Statistical Process Monitoring Technology. *Emerson Process Management*, 2006. 7 p. Available at: <https://manualzz.com/doc/11817603/detection-of-plugged-impulse-lines-using-statistical-proc>.

12. Hashemian H. *Sensor performance and reliability*. ISA, The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2005. 306 p.

13. Coble J., Ramuhalli P., Meyer R., Hashemian H. Online Sensor Calibration Assessment in Nuclear Power Systems. *IEEE: Instrumentation & Measurement Magazine*, 2013, vol. 16, no. 3, pp. 32–37.

14. Coble J., Ramuhalli P., Meyer R., Hashemian H., Shumaker B., Cummins D. Calibration Monitoring for Sensor Calibration Interval Extension: Identifying Technical Gaps. *Future of Instrumentation International Workshop (FIIW) Proceedings*, 2012, pp. 1–4.

15. Hashemian H. Measurement of Dynamic Temperatures and Pressures in Nuclear Power Plants. *Electronic Thesis and Dissertation Repository*, 2011, no. 189. 214 p.

16. Blázquez J. When a Pressure Transmitter Leaves the Linearity: the Rosemount Case. *Int. J. Nuclear Energy Science and Technology*, 2006, vol. 2, no. 3, pp. 299–307.

Received 28 May 2020

УДК 681.518.5, 620.19, 681.2.08

DOI: 10.14529/ctcr200306

АЛГОРИТМЫ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ ШТУЦЕРНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

О.Ю. Бушув, Е.С. Тугова, М.А. Моторина

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Введение. В условиях перехода мировой промышленности к новым производственным технологиям актуальной является задача мониторинга технического состояния компонентов систем автоматического управления, которыми, в частности, являются датчики давления. Несмотря на наличие исследований и разработок, направленных на создание систем диагностики и самодиагностики датчиков давления, остаются недостаточно изученными механизмы деградации механических частей датчиков и алгоритмы диагностики их состояния в процессе эксплуатации.

Цель исследования. Предложить алгоритмы диагностики технического состояния механико-гидравлической системы преобразователя давления штуцерного исполнения.

Материалы и методы. Данное исследование основывается на проведенных испытаниях экспериментальных образцов модулей давления с дефектами, моделирующими вытекание жидкости из разделительной полости механико-гидравлической системы преобразователя, изготовленных с участием производителя датчиков давления. Метод диагностики неисправности основан на анализе статистических характеристик сигнала на выходе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) модуля давления.

Результаты. В ходе испытаний были подтверждены гипотезы о зависимости среднеквадратического отклонения (СКО) выходного сигнала модуля давления от количества разделительной жидкости в канале. На основе полученных данных были предложены алгоритмы диагностики технического состояния датчика давления, которые в качестве диагностического параметра используют значения СКО сигнала датчиков. Алгоритмы предусматривают проверку условий применимости рассматриваемого метода и используют дополнительную информацию о технологическом процессе. Сформулированы задачи, которые необходимо решить для практической реализации алгоритмов в реальном производстве.

Заключение. Предложенные алгоритмы диагностики технического состояния датчика давления отличаются от известных алгоритмов диагностики тем, что используют результаты экспериментальных исследований и направлены на выявление неисправности механической части датчиков. Алгоритмы могут быть использованы для мониторинга технического состояния датчиков давления штурцерного исполнения в процессе эксплуатации при соблюдении определенных условий, которые необходимо уточнить в процессе дальнейших исследований и полевых испытаний.

Ключевые слова: мониторинг технического состояния, датчики давления, техническая диагностика, анализ шума, среднеквадратическое отклонение.

Литература

1. Княгинин, В.Н. *Новая технологическая революция: вызовы и возможности для России: экспертно-аналитический доклад* / В.Н. Княгинин. – М.: Центр стратегических разработок, 2017. – 136 с.
2. Feng, Z. *Design and implementation of a self-validating pressure sensor* / Z. Feng, Q. Wang, K. Shida // *IEEE SENSORS JOURNAL*. – 2009. – V. 9, no. 3. – P. 207–218.
3. Taymanov, R. *SENSOR DEVICES WITH METROLOGICAL SELF-CHECK* / R. Taymanov, K. Sapozhnikova, I. Druzhinin // *Sensors and Transducers*. – 2011. – V. 133, № 10. – P. 30–45.
4. Belozubov, E.M. *Metrological Self-Checking of Smart Sensors of Measurement and Control Systems* / E.M. Belozubov, V.A. Vasil'ev, P.S. Chernov // *Meas Tech*. – 2018. – V.61. – P. 660–669.
5. Ларионов, В.А. *Способ метрологического самоконтроля тензорезистивного датчика давления* / В.А. Ларионов // *Метрология*. – 2020. – No. 1. – С. 48–68.
6. *Detecting changes in the condition of a pressure transducer by analyzing its output signal* / O.Yu. Bushuev, A.S. Semenov, A.O. Chernavskiy, A.L. Shestakov // *Proceedings of XX IMEKO World Congress "Metrology for Green Growth", Busan, Republic of Korea. – September 9–14, 2012*.
7. Бушуев, О.Ю. *Экспериментальное исследование возможности диагностики состояния тензометрического преобразователя давления на основе анализа его выходного сигнала* / О.Ю. Бушуев, А.С. Семенов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2012. – Т. 17, № 35(294). – С. 65–68.
8. Семенов, А.С. *Модель самодиагностирующегося датчика с нелинейной функцией преобразования* / А.С. Семенов, А.Л. Шестаков // *«Средства и технологии получения и обработки измерительной информации»: сборник трудов международной научно-технической конференции «Шляндинские чтения» (10–12 нояб. 2014 г.)*. – Пенза, 2014. – С. 142–147.
9. Patent No. 7254518 U.S. *Pressure Transmitter with Diagnostics* / E. Eryurek, K. Kavaklioglu. – Appl. 15.03.2004; publ. 07.08.2007; filed by Rosemount Inc.
10. Patent No. 7680549 U.S. *Diagnostics in Industrial Process Control System*, appl. 04.04.2006, publ. 16.03.2010 / Kavaklioglu, K., Wehrs, D.L., Lattimer, D.R., Eryurek, E.; filed by Fisher Rosemount Systems Inc.
11. Wehrs, D. *Detection of Plugged Impulse Lines Using Statistical Process Monitoring Technology* / D. Wehrs. – Emerson Process Management, 2006. – 7 p.

12. Hashemian, H. *Sensor performance and reliability* / H. Hashemian. – ISA: The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2005. – 306 p.

13. *Online Sensor Calibration Assessment in Nuclear Power Systems* / J. Coble, P. Ramuhalli, R. Meyer, H. Hashemian // *IEEE: Instrumentation & Measurement Magazine*. – 2013. – V. 16. – No. 3. – P. 32–37.

14. *Calibration monitoring for sensor calibration interval extension: Identifying technical gaps* / J. Coble, P. Ramuhalli, R. Meyer et al. // *Future of Instrumentation International Workshop (FIIW) Proceedings*. – 2012. – P. 1–4.

15. Hashemian, H. *Measurement of Dynamic Temperatures and Pressures in Nuclear Power Plants* / H. Hashemian. – *Electronic Thesis and Dissertation Repository*. – 2011. – No. 189.

16. Blázquez, J. *When a pressure transmitter leaves the linearity: the Rosemount Case* / J. Blázquez // *Int. J. Nuclear Energy Science and Technology*. – 2006. – V. 2, No. 3. – P. 299–307.

Бушув Олег Юрьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры информационно-измерительной техники, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории технической самодиагностики и самоконтроля приборов и систем, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; bushuevoi@susu.ru.

Тугова Екатерина Сергеевна, инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории технической самодиагностики и самоконтроля приборов и систем, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; tugovaes@susu.ru.

Моторина Мария Андреевна, студент кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; motorina_maria97@mail.ru.

Поступила в редакцию 28 мая 2020 г.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Bushuev, O.Yu. Algorithms for In-line Pressure Transmitters Condition Monitoring / O.Yu. Bushuev, E.S. Tugova, M.A. Motorina // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 57–65. DOI: 10.14529/ctcr200306

FOR CITATION

Bushuev O.Yu., Tugova E.S., Motorina M.A. Algorithms for In-line Pressure Transmitters Condition Monitoring. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 57–65. DOI: 10.14529/ctcr200306

Управление в социально-экономических системах

УДК 330.161

DOI: 10.14529/ctcr200307

ФОРМИРОВАНИЕ ОЦЕНОЧНОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ СТЕЙКХОЛДЕРОВ В ПРОЕКТЕ

С.А. Баркалов, Т.А. Аверина, З.О. Брежнева

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация. «Подключение» к проектам большого числа заинтересованных сторон и объективная невозможность удовлетворения интересов абсолютного большинства стейкхолдеров обуславливают актуальность разработки моделей ресурсного обмена, ориентированных, в первую очередь, на их допустимость для агентов и только потом – на оптимальность.

Цель исследования. Разработать прикладную модель оценки и управления ресурсным взаимодействием причастных сторон проекта.

Материалы и методы. В качестве базовой модели для реализации поставленной цели применяется линейная модель международной торговли. Исходные данные для подстановки в модель характеризуют структуру взаимоотношений между агентами обмена и могут быть получены в результате применения модифицированного инструмента анализа иерархий.

Результаты. Получена прикладная модель оценки и управления ресурсным взаимодействием. С помощью средства «Поиск решений» программы MS Excel получены результаты практического апробирования модели оценки допустимого ресурсного взаимодействия стейкхолдеров.

Заключение. Результаты практического применения модели представляются в формате двух векторов: «допустимого» и «действительного» ресурсных обменов. В зависимости от содержательной интерпретации результатов исследователь может оценивать разбалансированность ресурсного обмена или устанавливать приоритетность стейкхолдеров в проекте, управлять отклонениями.

Ключевые слова: стейкхолдер, ресурсный обмен, допустимое решение, симметрия, линейная модель.

Введение

Широкое распространение стейкхолдер-менеджмента началось после публикации в 1984 году работы Р. Фримена [1]. В ней впервые был предложен термин «стейкхолдер» и идея рассмотрения фирмы и ее окружения как совокупности стейкхолдеров, интересы которых должны быть учтены. Если говорить о терминологии, то «stakeholder» в переводе с английского означает «держатель интереса». В русском языке существуют различные интерпретации и синонимы: заинтересованная сторона, группа влияния, группа интересов, причастная сторона и другие. Чтобы определить, какая вариация наиболее точно соответствует оригинальному видению, рассмотрим трактовку Р. Фримена: «Стейкхолдер – любая группа или индивид, которые могут влиять или на которые влияет достижение целей организации» [1].

Исследователь М.А. Петров [2] отмечает, что ошибочно считать Р. Фримена первооткрывателем теории стейкхолдеров, так как некоторые выводы о наличии в окружении фирмы заинтересованных сторон содержатся и у более ранних исследователей [3]. Однако труд Р. Фримена, безусловно, важен, работа внесла ясность в понимание теории заинтересованных групп.

К числу других заслуженных зарубежных авторов в исследуемой области можно отнести Р. Митчелла, Л. Престона, Дж. Фрумена, А. Шапиро [4, 5]. Для рассматриваемой темы интересны также идеи основоположников теории ресурсных отношений – Дж. Барни [6], Р. Грант,

Дж. Пфедфер, Г. Салансик. Среди отечественных исследователей, развивающих направление ресурсного взаимодействия стейкхолдеров, можно выделить М.А. Петрова [2], В.Н. Буркова [7], С.А. Баркалова [8], А.А. Гресько, К.С. Солодухина [9, 10] и др.

Сегодня стейкхолдер-менеджмент выступает в качестве одной из функциональных областей управления проектами, поэтому подход направлен на изучение взаимоотношений между индивидами и группами, интересы которых затрагивает факт инициации проекта. При этом влияние нельзя назвать односторонним: процесс реализации и конечные результаты проекта могут оказывать влияние на деятельность причастных сторон либо последние влияют на проект и получают выгоду [11, 12].

Развивая логику подхода, можно прийти к пониманию проекта как некоей совокупности взаимоотношений стейкхолдеров. Такой взгляд на проект коррелирует с представлениями о фирме основателя экономической школы нового институционализма Р. Коуза. В труде [13] исследователь трактует ее в качестве «пучка» контрактов. Интерпретация данной логики в теории стейкхолдеров позволяет говорить о том, что они как раз и являются сторонами контрактов, «пучок» которых составляет содержание проекта.

Определив проект как множество взаимоотношений стейкхолдеров, необходимо установить, что лежит в основе таких взаимодействий. Основанием для вступления в проект является обладание некоторым ресурсом, необходимым другим участникам для реализации их проектных ролей, при этом предложенный ресурс можно обменять на ресурсы остальных. Отметим, что оценить ресурсный вклад и ресурсные выгоды стейкхолдеров в проекте достаточно сложно, поэтому под ресурсами будем понимать все, что может быть полезно и соответствует сфере интересов заинтересованных сторон.

Согласно классификации Р. Гранта [14], ресурсы делятся на финансовые, материальные, человеческие, технологические, репутационные и организационные. Комбинирование ресурсов позволяет создавать новые ценности. То, что выступает конечным продуктом для одной стороны, является ресурсом для другой. Эта закономерность и создает возможности для ресурсного обмена. Оптимизировать ресурсный обмен – значит достичь наибольшую положительную дельту между притоком и оттоком ресурсов. Однако возникает логический вопрос: что лежит в основе положительного результата? Участники ресурсного обмена имеют различные представления о ценности ресурсов и их целевом использовании. Ресурсные оценки одного стейкхолдера едва ли могут совпасть с оценками другой заинтересованной стороны. Разные взгляды и формируют положительную дельту. Можно сказать, что поиск наилучшего соотношения собственных оценок с оценками оппонента составляет суть оптимизации.

В работе представлена формальная модель управления заинтересованными сторонами проекта с позиции целевого стейкхолдер-менеджмента и обоснование возможностей и ограничений ее практического применения. Так как модель ориентирована на достижение целевых установок менеджмента при удовлетворении нижних границ целевых функций остальных причастных сторон, введен критерий допустимости ресурсного обмена, при котором отношения обмена между заинтересованными сторонами будут характеризоваться симметрией (т. е. неотрицательностью, равенством «исходящих» и «входящих» ресурсов).

Далее для решения поставленной задачи приводится описание и комбинирование линейной модели международной торговли и метода анализа иерархий (МАИ). Последний позволяет установить собственные оценки агентов относительно значимости получаемых ресурсов, а линейная модель международного обмена реализует поиск симметричного соотношения собственных оценок оппонентов. В качестве результатов практического применения полученной методики оценки допустимости ресурсного взаимодействия с помощью средства «Поиск решений» программы MS Excel могут быть получены векторы «действительного» и «допустимого» ресурсного обмена. В зависимости от содержательной интерпретации результатов менеджер может оценивать разбалансированность ресурсного обмена или устанавливать приоритетность стейкхолдеров в проекте.

Оценка ресурсного обмена по критерию допустимости представляется важной задачей, так как обмен не может характеризоваться устойчивостью в условиях асимметрии и нарушения условия неотрицательности для агентов.

Достоинством методов, используемых для разработки методики оценки допустимости ресурсного взаимодействия стейкхолдеров, является относительная простота реализации с помощью известных вычислительных средств. Благодаря детальному рассмотрению структур «исхо-

дящих» и «входящих» ресурсов и оценке удовлетворенностей обменом с позиции каждого стейкхолдера модель позволяет оценить вклад каждой стороны в нарушение симметрии, что открывает дополнительные возможности для реализации точечных управленческих воздействий. В условиях проблем исследуемого направления (трудность формального описания поведения стейкхолдеров и, как следствие, отсутствие достаточного количества прикладных инструментов управления) представленная модель, позволяющая получить параметры симметричного ресурсного обмена и оценить допустимость существующего взаимодействия стейкхолдеров, является востребованной.

1. Модель управления заинтересованными сторонами проекта: возможности и ограничения

Специфика проекта очерчивает круг заинтересованных сторон и структуру ресурсных отношений, где каждый стейкхолдер преследует собственные цели, инструментом достижения которых является участие в проекте. Используя терминологию теории активных систем [7], можно сказать: каждая сторона имеет собственную целевую функцию вида:

$$f_i(x) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где i – порядковый номер стейкхолдера, X – вектор ресурсов, участвующих в обмене. Так как ресурсы характеризуются ограниченностью, значения x должны соответствовать условию: $X_{\min} \leq x \leq X_{\max}$.

Стейкхолдер – активный агент и может осуществлять выбор, поэтому с большей вероятностью примет участие в том проекте, который потенциально сможет принести наибольший эффект, то есть имеет наибольший нижний уровень достижения целевой функции:

$$F_i = F_{i0} \geq F_{ik}, \quad (2)$$

где F_i – нижняя граница достижения целевой функции i -го стейкхолдера на определенном множестве проектов, то есть минимально допустимый уровень, при котором стейкхолдер соглашается на обмен, 0 – порядковый номер данного проекта, F_{ik} – степень достижения целевой функции, обеспечиваемая проектом под номером k . Для удовлетворения i -го интереса проект должен как минимум сопровождаться нулевыми издержками, то есть удовлетворять нижней границе достижения целевой функции стейкхолдера или приносить положительное сальдо:

$$f_i(x) \geq F_i, \quad (3)$$

где $i = 1:n$, n – количество участников проекта кроме целевого стейкхолдера.

Особый статус в проекте имеет целевой стейкхолдер, поэтому ему присваивается порядковый номер $m + 1$. Менеджмент осуществляет управление компанией, в рамках которой реализуется проект (если рассматриваются внутрифирменные проекты), организует ресурсный обмен. Можно сказать, что целевой стейкхолдер выступает гарантом соблюдения правил игры, однако при этом остается заинтересованной стороной проекта, на которую также распространяются условия (1)–(3).

Показателем реализации проекта является некоторый эффект (сальдо Δ), который распределяется между участниками в зависимости от структуры ресурсного обмена и расстановки сил в проекте (то есть в зависимости от приоритетности, значимости стейкхолдеров) [2]:

$$F_i(x) = F_i + \Delta_i. \quad (4)$$

Таким образом, мы подошли к возможности математической постановки задачи управления стейкхолдерами в процессе реализации проекта [2]:

$$f_{m+i}(x) \rightarrow \max, D(x): \{f_i(x) \geq F_i, i \in [1; m + 1], X_{\min} \leq x \leq X_{\max}\}. \quad (5)$$

Содержательная интерпретация задачи (5) состоит в том, что менеджмент, реализуя управление стейкхолдерами проекта, стремится максимизировать свою целевую функцию на множестве допустимых решений $D(x)$. Допустимое множество определяется совокупностью условий: соблюдение неотрицательности ресурсного обмена (3) остальных заинтересованных сторон при ограниченности ресурсов.

Приведем содержательную интерпретацию основных параметров модели (5).

Целевая функция устанавливает зависимость степени удовлетворенности стейкхолдера от вектора получаемых ресурсов. Формализация функции не всегда возможна, так как бывает сложно оценить ресурсные ожидания количественно. В этом случае возможно использовать качественные показатели или ограничиться фактом стремления сторон при установлении взаимоотношений найти выгодный для себя ресурсный баланс.

F_i – нижняя граница целевой функции стейкхолдера, которая определяется рыночными, договорными, правовыми условиями, при этом последние являются требованиями высшего уровня, требуют обязательного исполнения: например, соблюдение МРОТ, экологических требований. Требования среднего уровня определяются конкурентными предложениями рынка. Например, клиент, проявляя рационализм, выберет проект с более привлекательной ценой, поэтому выход за пределы рынка приведет фирму к потере активной клиентской базы. Можно сказать, что рынок устанавливает интервал, в котором лежит значение F_i [2].

Окончательно F_i устанавливается на нижнем уровне в процессе взаимодействий стейкхолдеров и зависят от соотношений власти и умения выстраивать коммуникации.

Границы множества допустимых решений $D(x)$ определяются двумя типами ограничений. Во-первых, ограничения на вектор x означают, что требования сторон могут соблюдаться только в определенных рамках. Во-вторых, ограничения на минимально допустимые уровни целевых функций.

Целевая функция управляющего стейкхолдера f_{m+1} определена на множестве решений $D(x)$, которое имеет ограничивающие условия, поэтому задача будет иметь решение, если $D(x)$ окажется непустым. Пустота означает неэффективность менеджмента, то есть нарушение условий ресурсного обмена.

Стоит отметить, что $D(x)$ – нестабильное множество, так как на его параметры может значительным образом повлиять внешняя среда проекта. Ограничения множества определяют минимально необходимые условия для удовлетворения требований причастных сторон, поэтому нарушение границ приведет к потере интереса и выходу стейкхолдера из отношений ресурсного обмена.

На основании вышеизложенной модели управления заинтересованными сторонами проекта (5) можно заключить, что для удовлетворения i -го интереса проект должен, как минимум, сопровождаться нулевыми издержками, то есть удовлетворять нижней границе достижения целевой функции. Ситуацию достижения нижней границы целевой функции будем называть симметрией. Симметрия отношений обмена для стейкхолдера (т. е. равенство «исходящих» и «входящих» ресурсов, нулевой эффект) означает только обоснование возможности (допустимости) отношений. Аргументируем: даже если заинтересованная сторона получает эффект от участия в проекте в виде неотрицательного сальдо, это еще не означает, что ее отношения с целевым стейкхолдером оптимальны. С позиции рассматриваемой заинтересованной стороны симметричное распределение ресурсов, будучи возможным (т. е. не противоречащим условиям), еще не является наилучшим, поскольку модель (5) максимизирует целевую функцию целевого менеджмента. Совпадение целевых функций менеджмента и других стейкхолдеров возможно лишь случайно.

Ввиду того, что на практике удовлетворение абсолютно всех интересов в проекте не представляется возможным и осуществляется на основе приоритетов, важной характеристикой валидности модели обмена (5) является ее ориентированность в первую очередь на допустимость, непротиворечивое решение, и только потом – на оптимальность. Такое заключение соответствует стремлению менеджмента к реализации симметричного управления, ориентированного, в первую очередь, на удовлетворение нижних границ целевых функций причастных сторон.

Итак, установлено, что практическая реализация модели управления стейкхолдерами проекта может быть затруднена определением ряда ее параметров, в частности параметра F_i , то есть нижней границы целевых функций заинтересованных сторон, при которой ресурсный обмен является симметричным. Под симметричным обменом мы будем понимать ситуацию, при которой вклад в проект равняется эффекту от участия в нем, то есть равенство сальдо нулю. Для решения данной проблемы предложена методика оценки ресурсного взаимодействия стейкхолдеров, позволяющая установить параметры F_i одновременно для всех причастных сторон, то есть такую структуру обмена, при которой он будет симметричным. Ситуация симметрии гарантирует получение неотрицательного сальдо, что при наличии транзакционных издержек заинтересованных сторон позволяет считать такую модель ресурсного взаимодействия стейкхолдеров обоснованной.

2. Базовая модель для разработки методики оценки и управления ресурсным взаимодействием стейкхолдеров

В качестве базовой модели для разработки методики оценки и управления ресурсным взаимодействием примем алгоритм модели сбалансированной международной торговли [15].

Отличие структур векторов **A** и **C** свидетельствует о разбалансированности существующего ресурсного обмена. Для детального анализа причин разбалансированности целесообразно вычислить относительные различия векторов k_i [9, 10].

Полученные значения будут соответствовать степени разбалансированности ресурсного обмена i -го стейкхолдера с остальными. Чем ниже значение k_i , тем меньше разбалансированность.

$$k_i = \frac{|x_i^D - x_i^O|}{x_i^O}, \quad (8)$$

где x_i^D , x_i^O – координаты векторов действительного и симметричного ресурсного обмена соответственно.

Следующий этап анализа разбалансированности – определение вклада причастных сторон в нарушение баланса. Для этого обратимся к матрице **B** и найдём разность ее элементов относительно главной диагонали. Полученные данные будут свидетельствовать о различиях в удовлетворенности заинтересованных сторон взаимодействием между собой. Важно отметить, что полученные разности являются ключевыми индикаторами, так как если бы все противоположные элементы матрицы **B** совпадали, совпали бы и обе структуры обмена.

3. Обеспечение модели оценки и управления ресурсным взаимодействием входными данными: метод анализа иерархий

Во 2-м разделе статьи была сформулирована задача по определению векторов структуры допустимого и действительного ресурсных обменов причастных к проекту сторон. Модель имеет трудности практического применения, обусловленные необходимостью проведения значительного числа измерений для нахождения элементов матриц **A** (симметричная структура ресурсного обмена) и **B** (удовлетворенность ресурсным обменом). Это открывает дополнительные возможности для менеджера в выборе методик сбора и обработки данных для их последующего применения в модели оценки обоснованности ресурсного взаимодействия стейкхолдеров. Ранее было определено, что проект с позиции стейкхолдер-менеджмента представляет собой ресурсное взаимодействие его участников. Установление приоритетов относительно различных заинтересованных сторон позволяет определить, какое им следует уделять внимание при управлении.

В качестве метода установления относительной значимости ресурсов принято использовать метод парных сравнений. Таким образом, исходные элементы для матрицы **A** определяются модифицированным методом анализа иерархий (далее – МАИ) Т. Саати [16].

Это системная методика, позволяющая лицу, принимающему решение, находить вариант, максимально согласованный с его видением и пониманием проблемы. Сложное явление декомпозируется на простые составляющие, между которыми осуществляется выбор по заданному критерию. После обработки суждений и необходимых вычислений численно определяется относительная значимость альтернатив в виде вектора приоритетов. Сильная сторона методики – ее универсальность (применяется для решения разнообразных задач: для сравнения объектов или их свойств, для ранжирования, распределения ресурсов).

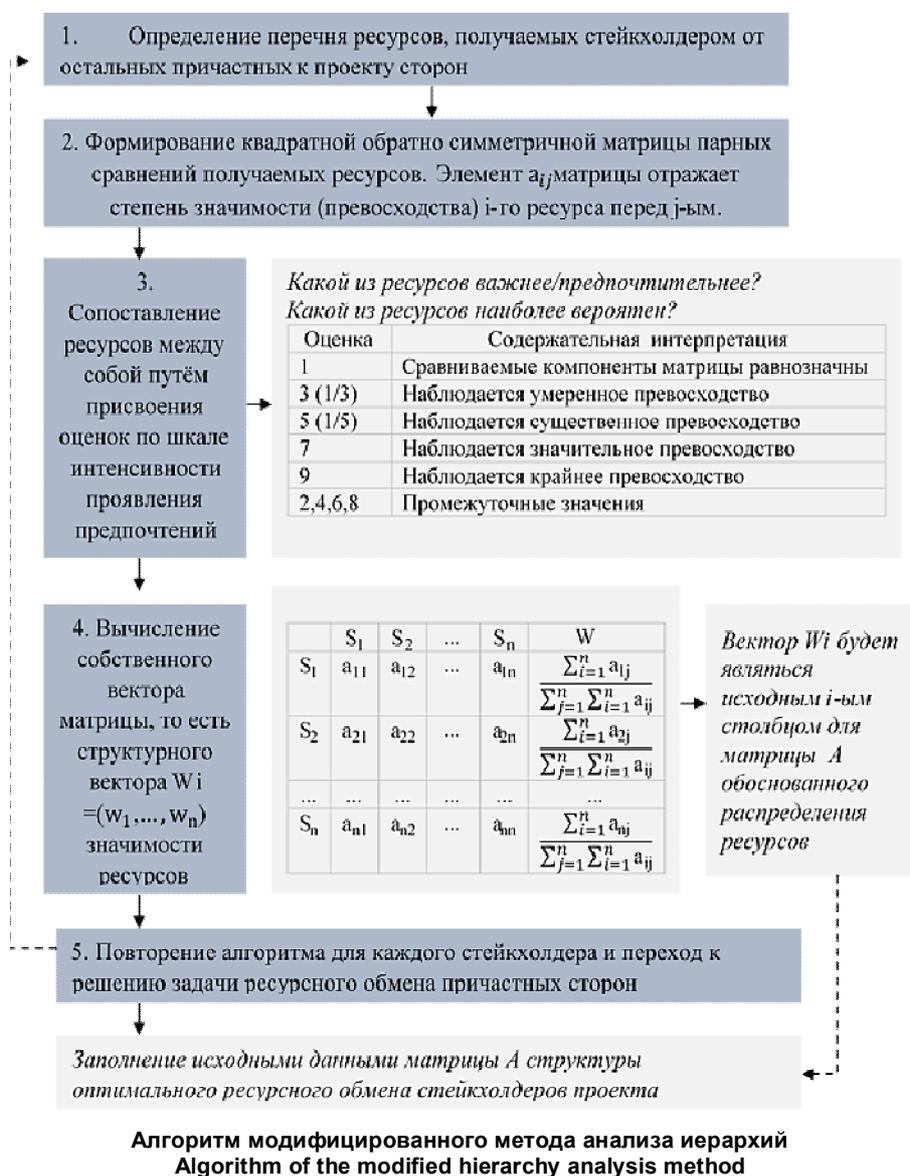
Дополнительно можно отметить естественность МАИ для менеджера, так как человеку в силу его психологических особенностей довольно трудно делать выбор из множества вариантов, гораздо проще осуществлять парное сравнение альтернатив по заданному критерию отбора. Алгоритм модифицированного МАИ представлен на рисунке.

Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы. Определение параметров вышеизложенной модели управления заинтересованными проектами (5) дает основание утверждать, что для удовлетворения i -го интереса ресурсообмен в проекте должен, как минимум, удовлетворять нижней границе i -й целевой функции, то есть быть симметричным.

Симметрия отношений обмена для стейкхолдера (т. е. равенство «исходящих» и «входящих» ресурсов) означает только обоснование возможности (допустимости) отношений. Следовательно, удовлетворение абсолютно всех интересов в проекте – довольно сложная задача. Распределение выгод, как правило, осуществляется на основе приоритетов.

Для получения параметров симметричного ресурсного обмена и проверки допустимости существующего ресурсного обмена разработана оценочная модель управления ресурсным взаимодействием стейкхолдеров. В качестве базового алгоритма модели используется линейный инструмент международного обмена, позволяющий найти оптимальное соотношение индивидуальных оценок стейкхолдеров относительно значимости ресурсов в проекте. Для обеспечения алгоритма входными данными применяется модифицированный метод анализа иерархий, позволяющий получить индивидуальные оценки причастных сторон.



Практическая реализация оценочной методики управления ресурсным взаимодействием позволяет получить векторы структуры симметричного и допустимого ресурсного обмена, на основании которых менеджер может произвести оценку допустимости взаимодействий, выявить отклонения и осуществить управляющие воздействия по восстановлению симметрии.

Литература

1. Freeman, R.E. *Strategic management: A stakeholder approach* / R.E. Freeman. – Boston: Pit139man Publishing. – 1984. – 276 p.
2. Петров, М.А. Теория заинтересованных сторон: пути практического применения / М.А. Петров // Вестник СПбГУ. Серия 8. – 2004. – Вып. 2, № 16. – С. 51–68.

3. *Dodd, E.M. Jr. For whom are corporate managers trustees? / E.M. Dodd // Harvard Law Review. – 1932. – Vol. 45. – P. 1145–1163.*
4. *Frooman, J. Stakeholder influence strategies / J. Frooman // Academy of Management Review. – 1999. – Vol. 24, no. 2. – P. 191–205.*
5. *Mitchell R.K., Toward a theory of stakeholder identification and salience: defining the principle of who and what really counts / R.K. Mitchell, B.R. Agle, D.J. Wood // Academy of Management Review. – 1997. – Vol. 22, no. 4. – P. 853–886.*
6. *Barney, J.B. Organizational culture: can it be a source of sustained competitive advantage? / J.B. Barney // Academy of management review. – 1986. – Vol. 11, no. 3. – P. 656–665.*
7. *Бурков, В.Н. Как управлять проектами / В.Н. Бурков, Д.А. Новиков. – М.: СИНТЕГ-ГЕО, 1997. – 192 с.*
8. *Баркалов, С.А. Задача размещения как способ распределения ресурсов в строительном проекте/ Системы управления и информационные технологии / С.А. Баркалов, П.Н. Курочка // Научно-технический журнал. – 2018 г. – № 1(71). – С. 89–98.*
9. *Солодухин, К.С. Проблемы применения теории заинтересованных сторон в стратегическом управлении организацией / К.С. Солодухин // Проблемы современной экономики. – 2007. – № 4. – С. 152–156.*
10. *Солодухин, К.С. Стратегическое управление вузом как стейкхолдер-компанией / К.С. Солодухин. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 290 с.*
11. *Аверина, Т.А. Механизм обратных приоритетов для решения ресурсных задач в строительстве / Т.А. Аверина, З.О. Брежнева // Управление большими системами: материалы XVI Всероссийской школы-конференции молодых учёных, 2019. – С. 303–308.*
12. *Аверина, Т.А. Управление строительными проектами с позиции стейкхолдеров / Т.А. Аверина, З.О. Брежнева // Управление строительством. – 2019. – № 1 (14). – С. 121–124.*
13. *Coase, R. The Nature of the Firm / R. Coase // Economica. – 1937. – Vol. 4, no. 16. – November. – P. 386–405.*
14. *Grant, R.M. The resource-based theory of competitive advantage: implications for strategy formulation / R.M. Grant // California Management Review. – 1991. – Spring. – P. 114–136.*
15. *Поттосина, С.А. Экономико-математические модели и методы: учеб. пособие / С.А. Поттосина, В.А. Журавлев. – Минск.: БГУИР, 2003. – 94 с.*
16. *Саати, Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т.Л. Саати. – М.: Радио и связь, 1989. – 316 с.*

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

Аверина Татьяна Александровна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; ta_averina@mail.ru.

Брежнева Зоя Олеговна, магистрант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; z.ya609@mail.ru.

Поступила в редакцию 27 мая 2020 г.

FORMATION OF AN ASSESSMENT MODEL FOR RESOURCE INTERACTION OF STAKEHOLDERS IN THE PROJECT

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

T.A. Averina, ta_averina@mail.ru,

Z.O. Brezhneva, z.ya609@mail.ru

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

The participation in projects of a large number of stakeholders and the objective impossibility of satisfying the interests of the absolute majority of stakeholders determine the relevance of developing resource exchange models, focused primarily on their acceptability for agents and only then on optimality.

Research objective. To develop an applied model for assessing and managing the resource interaction of the project stakeholders.

Materials and methods. A linear model of international trade is used as a base model for the implementation of the goal. Initial data for substitution into the model characterize the structure of relationships between exchange agents and can be obtained as a result of using a modified hierarchy analysis tool.

Results. An applied model for evaluating and managing resource interaction is obtained. Using the tool “Solver” of MS Excel.

Conclusion. The results of the practical application of the model are presented in the format of two vectors: the “permissible” and the “real” resource exchanges. Depending on the meaningful interpretation of the results, the researcher can evaluate the imbalance of the resource exchange or set the priority of stakeholders in the project, manage deviations.

Keywords: stakeholder, resource exchange, acceptability solution, symmetry, linear model.

References

1. Freeman R.E. Strategic Management: A Stakeholder Approach. Boston, Pit139man Publishing, 1984. 276 p.
2. Petrov M.A. [Stakeholder Theory: Practical Paths]. *Bulletin of St. Petersburg State University*, 2004, series 8, no. 16, pp. 51 – 68. (in Russ.)
3. Dodd E.M., Jr. For whom are Corporate Managers Trustees? *Harvard Law Review*, 1932, vol. 45, pp. 1145–1163.
4. Frooman J. Stakeholder Influence Strategies. *Academy of Management review*, 1999. vol. 24, no. 2, pp. 191–205.
5. Mitchell R.K., Agle B.R., Wood D.J. Toward a Theory of Stakeholder Identification and Salience: Defining the Principle of who and what Really counts. *Academy of Management Review*, 1997, vol. 22, no. 4, pp. 853–886.
6. Barney J.B. Organizational Culture: Can it be a Source of Sustained Competitive Advantage? *Academy of management review*, 1986, vol. 11, no. 3, pp. 656–665.
7. Burkov V.N., Novikov D.A. *Kak upravlyat' proektami* [How to Manage Projects]. Moscow, SINTEG-GEO, 1997. 192 p.
8. Barkalov S.A., Kurochka P.N. [The Allocation Problem as a Way of Allocating Resources in a Construction Project]. *Scientific and technical journal, Nuchnaya Kniga publishing house*, 2018, no. 1(71), pp. 89–98. (in Russ.)
9. Solodukhin K.S. [Problems of Applying Stakeholder Theory in Strategic Organization Management]. *Problems of the modern economy*, 2007, no. 4, pp. 152–156. (in Russ.)
10. Solodukhin K.S. *Strategicheskoe upravlenie vuzom kak stejkkholder-kompaniej* [Strategic management of the university as a steakholding company]. St. Petersburg, Publishing house of the Polytechnic University, 2009. 290 p.

11. Averina T.A., Brezhneva Z.O. [The Mechanism of Inverse Priorities for Solving Resource Problems in Construction. *Upravleniye bol'shimi sistemami: materialy XVI Vserossiyskoy shkoly-konferentsii molodykh uchonykh* [Management of Large Systems Materials of the XVI All-Russian School-Conference of Young Scientists], 2019, pp. 303–308. (in Russ.)
12. Averina T.A., Brezhneva Z.O. [Management of Construction Projects From a Position of Stakeholders]. *Construction management*, 2019, no. 1(14), pp. 121–124. (in Russ.)
13. Coase R. The Nature of the Firm. *Economica*, 1937, vol. 4, no. 16, pp. 386–405.
14. Grant R.M. The Resource-Based Theory of Competitive Advantage: Implications for Strategy Formulation. *California Management Review*, 1991, pp. 114–136.
15. Pottosina S.A., Zhuravlev V.A. *Ekonomiko-matematicheskie modeli i metody* [Economic-Mathematical Models and Methods]. Minsk, BSUIR, 2003. 94 p.
16. Saati T.L. *Prinyatiye resheniy. Metod analiza iyerarkhiy* [Decision making. Hierarchy Analysis Method]. Moscow, Radio and Communications, 1989. 316 p.

Received 27 May 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Баркалов, С.А. Формирование оценочной модели управления ресурсным взаимодействием стейкхолдеров в проекте / С.А. Баркалов, Т.А. Аверина, З.О. Брежнева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 66–75. DOI: 10.14529/ctcr200307

FOR CITATION

Barkalov S.A., Averina T.A., Brezhneva Z.O. Formation of an Assessment Model for Resource Interaction of Stakeholders in the Project. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 66–75. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200307

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА ПОД ВЛИЯНИЕМ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

С.А. Баркалов¹, А.Ю. Глушков¹, С.И. Моисеев^{1,2}

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия,

²Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Воронежский филиал, г. Воронеж, Россия

Введение. При планировании проектов, мероприятий, комплексов работ всегда необходимо учитывать влияние внутренних условий и внешней среды. В большинстве случаев влияние внешних факторов на проект является стохастическим и представляет собой случайный процесс. Научные разработки, позволяющие учитывать влияние внешней среды на разработку и реализацию проектов, всегда актуальны, так как они позволяют прогнозировать временные характеристики проектов в реальных условиях.

Цель исследования. В исследовании ставится задача разработать математическую модель, позволяющую в динамике прогнозировать временные показатели проектов с учетом влияния на них случайных внешних факторов.

Материалы и методы. Решить поставленную задачу удастся путем описания процесса влияния внешних факторов на проект математическими методами теории марковских случайных процессов. При этом влияющие на проект факторы условно делятся на те, которые приводят к необходимости проведения дополнительных мероприятий при разработке проектов, и на факторы, которые требуют кардинально менять проект. В работе применяются математические методы теории вероятности, теории дифференциальных уравнений, численные методы.

Результаты. На основании теории марковских случайных процессов разработана динамическая модель разработки и реализации проекта с учетом влияния на эти процессы внешних случайных факторов. Описана методика формирования и решения математической модели, позволяющей находить временные зависимости вероятностей завершения отдельных этапов разработки проекта и вероятности успешной реализации проекта в целом. Проведен анализ полученных решений, описаны общие тенденции разработки и реализации проектов с учетом влияния на них внешних факторов.

Заключение. Представленная модель позволяет оценивать вероятности выполнения проекта как в общем, так и отдельных ее этапов для разных временных интервалов, что позволит планировать временные сроки при управлении проектами. Модель может служить дополнением для процедур сетевого планирования и управления и давать дополнительные вероятностные оценки времени выполнения проекта.

Ключевые слова: управление проектами, случайный процесс, вероятность, внешние факторы, математическое моделирование.

Введение

Разработка сложных проектов – это динамический процесс, на который влияет множество случайных факторов, приводящих к быстрой смене внешних условий и внутренних факторов, влияющих на проект. Для математического моделирования таких процессов удобно использовать вероятностные подходы, а учитывая динамику, среди них наиболее подходящими являются подходы, основанные на теории случайных процессов [1–4]. Учитывая, что на систему подготовки и реализации проекта оказывает влияние множество случайных факторов, случайные процессы, протекающие в ней, будут близкими к марковским и для моделирования таких систем рационально использовать методы марковских случайных процессов с непрерывным временем и дискретным состоянием [1–4].

В данной работе приведена методика моделирования процесса разработки и последующей реализации некоторого проекта при быстрой смене условий и факторов, влияющих на проект, основанная на марковских случайных процессах.

1. Постановка задачи и ее математическая модель

Рассмотрим некоторый проект, который необходимо реализовать в будущем, и определим весь цикл его разработки и реализации, начиная с самого раннего момента принятия решений об осуществлении проекта.

Цикл осуществления проекта можно условно разбить на два последовательных этапа: стадию разработки и стадию реализации. Этап реализации проекта изучен достаточно хорошо, существует множество методик по его осуществлению и контролю исполнения, наиболее известные из которых – это методы сетевого планирования и управления [5, 6]. Исходя из этого, основное внимание уделим первому этапу, заключающемуся в разработке мероприятий по планированию проекта в условиях меняющейся обстановки и среды реализации проекта.

Введем несколько допущений, которые лягут в основе предлагаемой динамической модели:

1. При разработке проекта возможно два варианта его окончания: либо процесс разработки будет успешно окончен и можно приступать к реализации проекта, либо находятся некоторые факторы или условия (назовем их неблагоприятными), которые не позволяют реализовывать проект в этом виде, и возникает необходимость пересматривать проект и разрабатывать его заново.

2. При разработке проекта могут возникать факторы или условия, которые вносят неопределенность в условия реализации проекта (назовем их неопределенными), что требует дополнительных мероприятий, исследований, сбора информации и подобного, однако это не приводит на данном этапе к изменению проекта, а требует лишь его коррекции.

3. Неблагоприятные и неопределенные факторы являются случайными и могут возникнуть с определенной вероятностью в случайный момент времени.

4. Реализация проекта начинается только после успешной его разработки.

В соответствии с описанной схемой марковский случайный процесс можно задать в виде множества следующих состояний:

S_1 – состояние начала разработки проекта, принятия решений о мероприятиях проекта, сбора и обработки информации;

S_2 – состояние, когда необходимо проводить дополнительные мероприятия и исследования для наиболее эффективной реализации проекта;

S_3 – состояние, когда разработка проекта окончена и принимается решение либо о его реализации, либо, из-за ее невозможности, о начале разработки нового проекта;

S_4 – состояние окончания реализации проекта и сдачи его в эксплуатацию.

В соответствии с моделью марковских случайных процессов переход между состояниями S_i и S_j осуществляется под влиянием некоторого потока событий λ_{ij} , который связан со средним временем T_{ij} нахождения системы в состоянии S_i перед переходом в состояние S_j : $\lambda_{ij} = 1/T_{ij}$. Ввиду этого случайный процесс разработки и реализации проекта будет описываться следующими параметрами:

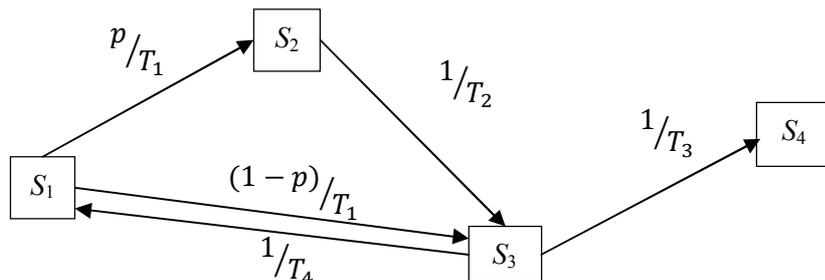
T_1 – среднее время разработки проекта до момента реализации или проведения дополнительных мероприятий, связанных с неопределенными факторами;

T_2 – среднее время проведения дополнительных мероприятий по разработке проекта, связанных с появлением неопределенных факторов;

T_3 – среднее время реализации проекта;

T_4 – среднее время между возникновением неблагоприятных факторов, приводящих к разработке нового проекта;

p – вероятность необходимости проведения дополнительных мероприятий, связанных с неопределенными факторами.



В соответствии с описанной схемой функционирования случайного процесса строим его граф состояний, который представлен на рис. 1.

Рис. 1. Граф состояний случайного процесса
Fig. 1. State graph of a random process

Ставится задача рассчитать временные зависимости вероятностей каждого состояния $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$ и $P_4(t)$, имеющие смысл вероятности того, что в произвольный момент времени t система будет находиться в этом состоянии. Последняя вероятность равна вероятности разработки и реализации всего проекта.

2. Методика решения поставленной задачи

В соответствии с графом состояний из рис. 1 для описания динамики процесса разработки и реализации проекта составляем систему уравнений Колмогорова [1], в которой каждому состоянию будет соответствовать дифференциальное уравнение вида:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = \frac{P_3(t)}{T_4} - \frac{P_1(t)}{T_1}; \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \frac{pP_1(t)}{T_1} - \frac{P_2(t)}{T_2}; \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \frac{P_2(t)}{T_2} + \frac{(1-p)P_1(t)}{T_1} - \left(\frac{1}{T_4} + \frac{1}{T_3}\right)P_3(t); \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \frac{P_3(t)}{T_3}. \end{cases} \quad (1)$$

Система уравнений (1) является вырожденной, и в ней одно (любое) уравнение системы нужно заменить на условие нормировки вида $P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) = 1$, сделаем это с третьим уравнением. В итоге получим систему дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = \frac{P_3(t)}{T_4} - \frac{P_1(t)}{T_1}; \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \frac{pP_1(t)}{T_1} - \frac{P_2(t)}{T_2}; \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \frac{P_3(t)}{T_3}; \\ P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Для нахождения частного решения системы (2) воспользуемся начальными условиями:

$$P_1(0) = 1; P_2(0) = 0; P_3(0) = 0; P_4(0) = 0, \quad (3)$$

которые имеют смысл того, что в начальный момент времени система находилась в состоянии S_1 .

Используя последнее уравнение системы, можно исключить из (2) вероятность третьего состояния, перейдя к системе из трех дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -\left(\frac{1}{T_4} + \frac{1}{T_1}\right)P_1(t) - \frac{1}{T_4}P_2(t) - \frac{1}{T_4}P_4(t) + \frac{1}{T_4}; \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \frac{p}{T_1}P_1(t) - \frac{1}{T_2}P_2(t); \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = -\frac{1}{T_3}(P_1(t) + P_2(t) + P_4(t)) + \frac{1}{T_3}. \end{cases} \quad (4)$$

Выражение (4) представляет собой систему линейных неоднородных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами [5, 6], которую удобно решать методом собственных значений и собственных векторов [7].

Общее решение будет состоять из суперпозиции общего однородного решения $P_i^o(t)$, $i = 1, 2, 4$ и частного неоднородного решения $P_i^h(t)$: $P_i(t) = P_i^o(t) + P_i^h(t)$. Рассмотрим общий подход к нахождению общего однородного решения. Оно имеет вид:

$$P_1^o(t) = C_1 V_1^{(1)} e^{\lambda_1 t} + C_2 V_2^{(1)} e^{\lambda_2 t} + C_3 V_3^{(1)} e^{\lambda_3 t};$$

$$P_2^o(t) = C_1 V_1^{(2)} e^{\lambda_1 t} + C_2 V_2^{(2)} e^{\lambda_2 t} + C_3 V_3^{(2)} e^{\lambda_3 t};$$

$$P_4^o(t) = C_1 V_1^{(3)} e^{\lambda_1 t} + C_2 V_2^{(3)} e^{\lambda_2 t} + C_3 V_3^{(3)} e^{\lambda_3 t},$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – собственные числа системы (4), которые находятся из решения характеристического уравнения:

$$\begin{vmatrix} -\left(\frac{1}{T_4} + \frac{1}{T_1}\right) - \lambda & -\frac{1}{T_4} & -\frac{1}{T_4} \\ \frac{p}{T_1} & -\frac{1}{T_2} - \lambda & 0 \\ -\frac{1}{T_3} & -\frac{1}{T_3} & -\frac{1}{T_3} - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (5)$$

а $\mathbf{V} = \begin{pmatrix} V_1^{(1)} & V_2^{(1)} & V_3^{(1)} \\ V_1^{(2)} & V_2^{(2)} & V_3^{(2)} \\ V_1^{(3)} & V_2^{(3)} & V_3^{(3)} \end{pmatrix}$ – матрица из собственных векторов системы (4), соответствующая ха-

рактеристическому уравнению (5).

С учетом того, что вектор неоднородных функций системы (4) представляет собой константы:

$\begin{pmatrix} 1/T_4 \\ 0 \\ 1/T_3 \end{pmatrix}$, неоднородное решение будет иметь вид некоторых постоянных $P_i^h = A_i$, которые находят-

ся путем подстановок неоднородного решения в (4). В итоге, также используя условие нормировки, находим частное неоднородное решение:

$$P_1^h = 0; P_2^h = 0; P_3^h = 0; P_4^h = 1.$$

Для нахождения неопределенных констант C_1, C_2, C_3 используем начальные условия (3). Вероятность состояния S_3 получаем из условия нормировки в виде: $P_3(t) = 1 - P_1(t) - P_2(t) - P_4(t)$.

3. Анализ полученных результатов

Проведем анализ полученного решения для разных значений параметров задачи. Для наглядности, и учитывая то, что аналитическое решение сильно зависит от параметров задачи, сделаем это графически.

На рис. 2 приведены временные зависимости вероятностей каждого состояния $P_1(t), P_2(t), P_3(t)$ и $P_4(t)$ за 20 дней после начала разработки проекта, которые характеризуют вероятностную продолжительность каждого этапа разработки и реализации объекта с учетом влияния внешних факторов.

Как видно из рис. 2, продолжительность этапа начала разработки проекта быстро приближается к нулю, вероятности состояний с проведением дополнительных мероприятий и процесса принятия решений о реализации проекта имеют экстремумы, а вероятность выполнения проекта в общем монотонно стремится к единице, что согласуется с поставленной задачей.

Проанализируем теперь влияние параметров модели на рассчитанные вероятности. В качестве анализируемой вероятности возьмем P_4 , так как она имеет смысл вероятности выполнения всего проекта в целом. На рис. 3 приведена временная зависимость этого показателя от среднего времени реализации проекта T_3 .

Как видно из рис. 3, средняя продолжительность этапа реализации проекта сильно влияет на весь цикл, понижая ее при увеличении продолжительности этапа.

Очевидно, что на указанную вероятность должна оказывать влияние и интенсивность появления неблагоприятных факторов, которая характеризуется параметром T_4 . Эта зависимость представлена на рис. 4.

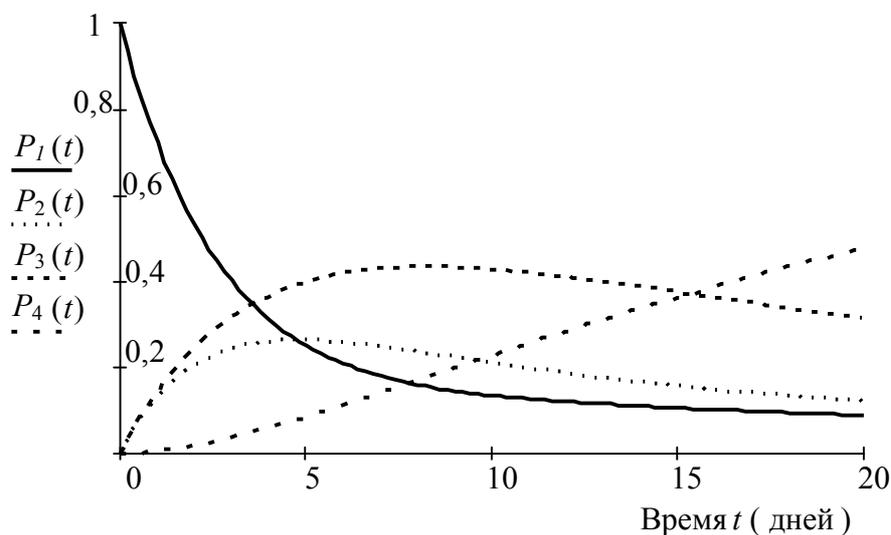


Рис. 2. Временные зависимости вероятностей состояний при значениях параметров $T_1 = 3$ дня, $T_2 = 5$ дней, $T_3 = 15$ дней, $T_4 = 12$ дней, $\rho = 0,5$
 Fig. 2. Temporal dependences of state probabilities at parameter values $T_1 = 3$ days, $T_2 = 5$ days, $T_3 = 15$ days, $T_4 = 12$ days, $\rho = 0,5$

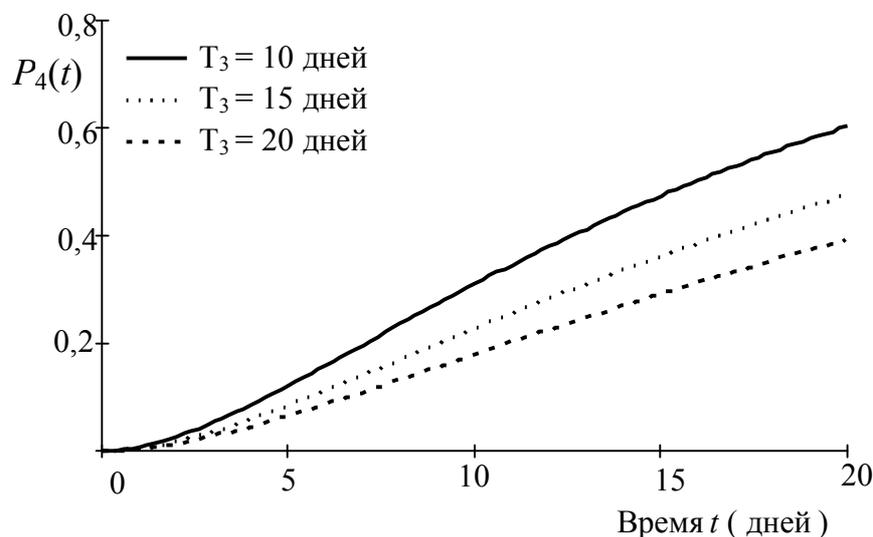


Рис. 3. Временные зависимости вероятности выполнения проекта при разных значениях параметра T_3 ($T_1 = 3$ дня, $T_2 = 5$ дней, $T_4 = 12$ дней, $\rho = 0,5$)
 Fig. 3. Temporal dependences of the probability of the project at different values of the parameter T_3 ($T_1 = 3$ days, $T_2 = 5$ days, $T_3 = 5$ days, $\rho = 0,5$)

Как видим, это влияние менее выраженное, чем в предыдущем графике, но значительнее, причем чем выше интенсивность появления неблагоприятных факторов, тем меньше вероятность реализации проекта.

Как было сказано ранее, этап проведения дополнительных мероприятий и исследований для наиболее эффективной реализации проекта S_2 является вероятностным и его необходимость определяется параметром p . Зависимость вероятности реализации проекта от этого параметра представлена на рис. 5.

Видно, что необходимость проведения дополнительных мероприятий понижает общую вероятность выполнения проекта за заданное время.

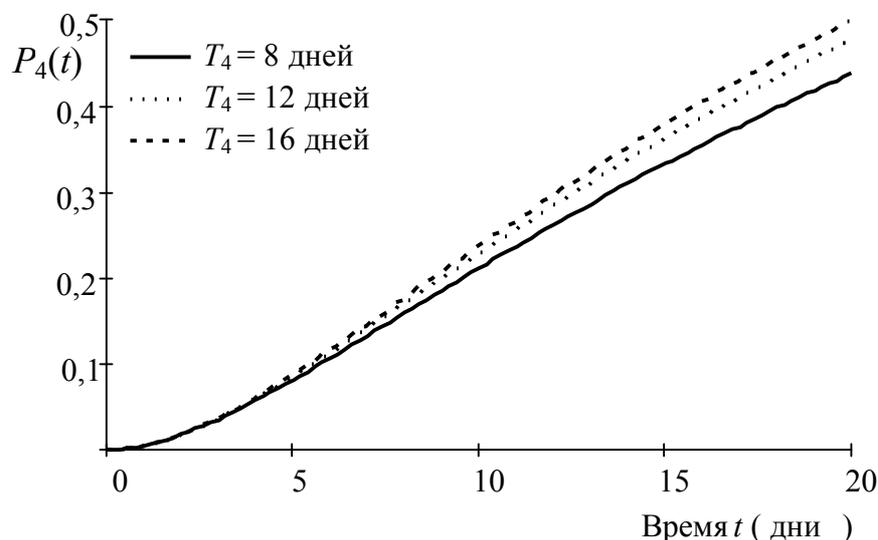


Рис. 4. Временные зависимости вероятностей выполнения проекта при разных значениях параметра T_4 ($T_1 = 3$ дня, $T_2 = 5$ дней, $T_3 = 15$ дней, $p = 0,5$)
Fig. 4. Temporal dependences of the probabilities of the project at different values of the parameter T_4 ($T_1 = 3$ days, $T_2 = 5$ days, $T_3 = 15$ days, $p = 0,5$)

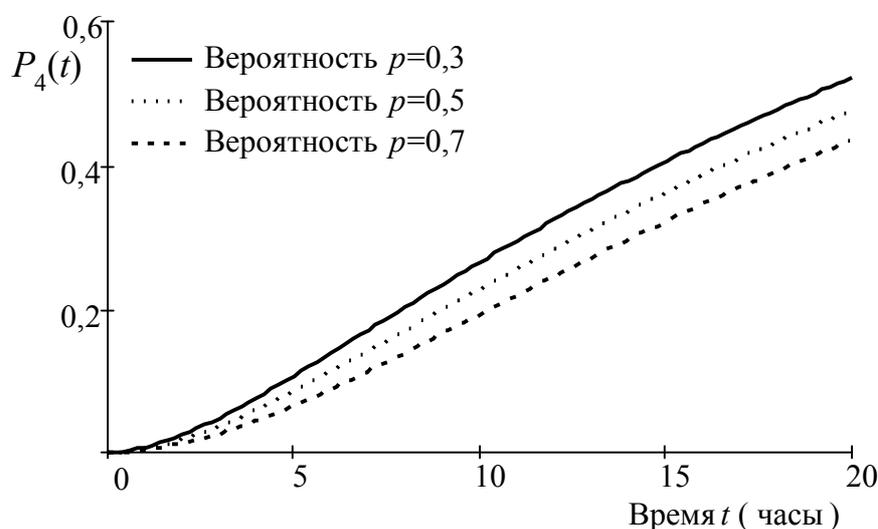


Рис. 5. Временные зависимости вероятности реализации проекта при разных значениях параметра p ($T_1 = 3$ дней, $T_2 = 5$ дней, $T_3 = 15$ дней, $T_4 = 12$ дней)
Fig. 5. Temporal dependences of the probability of project implementation at different values of the parameter p ($T_1 = 3$ days, $T_2 = 5$ days, $T_3 = 15$ days, $T_4 = 12$ days)

Заключение

Таким образом, на основании теории марковских случайных процессов разработана динамическая математическая модель разработки и реализации проекта с учетом влияния на эти процессы внешних случайных факторов.

Представленная модель позволяет оценивать вероятности выполнения проекта как в общем, так и отдельных ее этапов для разных временных интервалов, что позволит планировать времен-

ные сроки при управлении проектами. Путем перераспределения ресурсов для разных этапов [8] можно изменять их среднюю продолжительность и добиваться более высокого качества при разработке и реализации проектов с учетом влияния на них непредвиденных и форс-мажорных обстоятельств.

Модель может служить дополнением к стандартным процедурам сетевого планирования и управления и давать дополнительные вероятностные оценки времени выполнения проектов. Представленная методика расчета вероятностных параметров в динамике ее изменений позволит проводить аналогичные расчеты для иных состояний системы, в которой реализуется марковский случайный процесс, что позволит проводить расчеты для конкретных проектов с определенными внешними воздействиями на него.

Литература

1. Вентцель, Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высш. шк., 1998. – 354 с.
2. Баркалов, С.А. Математические методы и модели в управлении и их реализация в MS Excel / С.А. Баркалов, С.И. Моисеев, В.Л. Порядина. – Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2015. – 265 с.
3. Матальцкий, М.А. Элементы теории случайных процессов: учебное пособие / М.А. Матальцкий. – Гродно: ГрГУ, 2004. – 326 с.
4. Миллер, Б.М. Теория случайных процессов в примерах и задачах / Б.М. Миллер, А.Р. Панков. – М.: Физматлит, 2002. – 320 с.
5. Арнольд, В.И. Обыкновенные дифференциальные уравнения / В.И. Арнольд. – М.: МЦНМО, 2012. – 344 с.
6. Агафонов, С.А. Дифференциальные уравнения. Вып. VIII / С.А. Агафонов. – М.: МГТУ, 2011. – 347 с.
7. Амелькин, В.В. Автономные и линейные многомерные дифференциальные уравнения / В.В. Амелькин. – М.: УРСС, 2010. – 144 с.
8. Модели и методы распределения ресурсов в управлении проектами / С.А. Баркалов, И.В. Буркова, В.Н. Колпачев, А.М. Потапенко. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2004. – 87 с.

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; barkalov@vgsu.vrn.ru.

Глушков Александр Юрьевич, старший преподаватель, аспирант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; alex-maslovra@mail.ru.

Моисеев Сергей Игоревич, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий в экономике, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Воронежский филиал, доцент кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; mail@moiseevs.ru.

Поступила в редакцию 27 мая 2020 г.

DYNAMIC MODEL OF DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF THE PROJECT UNDER THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS

S.A. Barkalov¹, barkalov@vgasu.vrn.ru,
A.Yu. Glushkov¹, alex-maslovra@mail.ru,
Moiseev S.I.^{1,2}, mail@moiseevs.ru

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,

²Plekhanov Russian University of Economics, Voronezh branch, Voronezh, Russian Federation

Introduction. When planning projects, events, work packages, it is always necessary to take into account the influence of internal conditions and the external environment. In most cases, the influence of external factors on the project is stochastic and is a random process. Scientific developments allowing to take into account the influence of the external environment on the development and implementation of projects are always relevant, since they will allow to predict the temporal characteristics of projects in real conditions.

Aim. In scientific research, the task is to develop a mathematical model that allows dynamics to predict the temporal performance of projects, taking into account the influence of random external factors on them.

Materials and methods. It is possible to solve the problem by describing the process of the influence of external factors on the project by mathematical methods of the theory of Markov random processes. At the same time, factors affecting the project are conditionally divided into those that lead to the need for additional activities in the development of projects, and to factors that require a fundamental change in the project. In a scientific study, mathematical methods of probability theory, the theory of differential equations, and numerical methods are used.

Results. Based on the theory of Markov random processes, a dynamic model for the development and implementation of the project was developed taking into account the influence of external random factors on these processes. A methodology for the formation and solution of a mathematical model is described, which allows one to find the time dependences of the probabilities of completion of individual stages of project development and the probability of successful implementation of the project as a whole. The analysis of the solutions obtained is carried out, general trends in the development and implementation of projects are described taking into account the influence of external factors on them.

Conclusion. The presented model makes it possible to evaluate the probabilities of the project in general and of its individual stages for different time intervals, which will allow you to plan timelines for project management. The model can complement the network planning and management procedures and provide additional probabilistic estimates of the project time.

Keywords: project management, random process, probability, external factors, mathematical modeling.

References

1. Ventzel E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya sluchaynykh protsessov i yeye inzhenernyye prilozheniya* [The Theory of Random Processes and its Engineering Applications]. Moscow, Higher School, 1998. 354 p.
2. Barkalov S.A., Moiseev S.I., Poryadina V.L. *Matematicheskie metody i modeli v upravlenii i ih realizatsiya v MS Excel* [Mathematical Methods and Models in Management and Their Implementation in MS Excel]. Voronezh, SUACE Publ., 2015. 265 p.
3. Matalytsky M.A. *Elementy teorii sluchaynykh protsessov: uchebnoye posobiye* [Elements of the Theory of Random Processes: Tutorial]. Grodno, Publishing House of the State University, 2004. 326 p.
4. Miller B.M., Pankov A.R. *Teoriya sluchaynykh protsessov v primerakh i zadachakh* [The Theory of Random Processes in Examples and Problems]. Moscow, Fizmatlit, 2002. 320 p.
5. Arnold V.I. *Obyknovennyye differentsial'nyye uravneniya* [Ordinary Differential Equations]. Moscow, ICMMO, 2012. 344 p.

6. Agafonov S.A. *Differentsial'nyye uravneniya. Vyp. VIII* [Differential Equations. Vol. VIII]. Moscow, MSTU, 2011. 347 p.

7. Amelkin V.V. *Avtonomnyye i lineynyye mnogomernyye differentsial'nyye uravneniya* [Autonomous and linear multidimensional differential equations]. Moscow, URSS, 2010. 144 p.

8. Barkalov S.A., Burkova I.V., Kolpachev V.N., Potapenko A.M. *Modeli i metody raspredeleniya resursov v upravlenii proyektami* [Models and methods of resource allocation in project management]. Moscow, Institute for Management Problems named after V.A. Trapeznikova RAS, 2004. 87 p.

Received 27 may 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Баркалов, С.А. Динамическая модель разработки и реализации проекта под влиянием внешних факторов / С.А. Баркалов, А.Ю. Глушков, С.И. Моисеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 76–84. DOI: 10.14529/ctcr200308

FOR CITATION

Barkalov S.A., Glushkov A.Yu., Moiseev S.I. Dynamic Model of Development and Implementation of the Project under the Influence of External Factors. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 76–84. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200208

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ РАЗВИТИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА В ГЕРМАНИИ

С.А. Варламова, П.В. Котков

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
филиал в г. Березники, г. Березники, Россия*

Введение. В статье рассматривается новая модель зависимости индекса человеческого ресурса государства от набора факторов. Индекс человеческого ресурса не имеет общемировой методики оценки, однако весьма важен для управления государством. Одним из методов формального оценивания характеристики большой социально-экономической системы является обоснованное ранжирование частных критериев.

Цель работы. С использованием только формальных методов математического моделирования разработать рекомендации по повышению показателей индекса человеческого развития на государственном уровне.

Материалы и методы. Выбраны частные критерии, описывающие индекс человеческого развития. Определена их ранжировка, обеспечивающая наибольшую гладкость годового тренда. Построен набор математических моделей, которые оценивались как по аппроксимации исходных данных, так и по качеству постпрогноза. В качестве рабочей выбрана регрессионно-дифференциальная модель второго порядка, показаны ее преимущества и недостатки по сравнению с линейной многофакторной моделью. Исследовано влияние изменений управляемых и неуправляемых факторов на показатели индекса человеческого развития. Показаны возможности по управлению системой.

Заключение. На основании краткосрочных прогнозов сформулированы рекомендации по улучшению показателей индекса человеческого развития.

Ключевые слова: прогнозирование, математическое моделирование, индекс человеческого развития.

Введение

Индекс человеческого развития (ИЧР) [1] – показатель, который преобразует данные уровня жизни, образованности и долголетия за определенный период времени как основных характеристик человеческого потенциала на исследуемой территории в единое значение. Индекс человеческого развития позволяет оценить, развивается ли страна в ключе интересов своих граждан или же нет. Однако на показатели, участвующие в ИЧР, оказывают свое влияние и другие факторы – какие-то в большей степени, какие-то в меньшей.

Рассматриваемая задача является многокритериальной, и итоговый критерий (y_0) представляет собой взвешенную сумму частных критериев. В качестве частных критериев рассматриваются: средняя зарплата по стране (дол. США) (y_1), средняя продолжительность жизни (лет) (y_2), валовый национальный доход по приоритету покупательской способности (ВНД ППС) на душу населения (дол. США) (y_3), государственные расходы на образование (млн дол. США) (y_4). Данные реакции были выбраны, поскольку они содержатся в ИЧР.

В качестве факторов, оказывающих воздействие на объект исследования, выбраны [2, 3]: количество безработных (млн чел.) (x_1), валовый внутренний продукт (ВВП) на человека (тыс. дол. США) (x_2), расход государства на медицину на одного человека (дол. США) (x_3), количество зафиксированных преступлений (x_4), цена продуктовой корзины (дол. США) (x_5), курс доллара к национальной валюте (x_6), количество туристических отправок из страны (млн чел. год) (x_7), количество человек, имеющих доступ к сети Интернет (млн чел.) (x_8), количество перелетов внутри страны (млн чел.) (x_9), расходы государства на инновационные разработки (млн дол. США.) (x_{10}).

Выбранные факторы влияют на реакции следующим образом: количество безработных косвенно указывает на наличие рабочих мест в стране; ВВП на человека косвенно указывает на экономическое состояние страны; количество зафиксированных нападений косвенно указывает на общую безопасность граждан страны; цена продуктовой корзины в целом указывает на продо-

Управление в социально-экономических системах

вольственную безопасность; количество перелетов внутри страны и за её пределами соответствует параметрам мобильности граждан; количество вложенных денег в науку косвенно указывает на вклад государства в науку и косвенно – на появление инноваций в стране.

Исходные данные были взяты из открытого источника в сети Интернет¹.

Годовые ряды факторов и критериев представлены в табл. 1.

Таблица 1

Критерии и факторы

Table 1

Criteria and factors

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
y_1	2920	2950	3004	3103	3141	3227	3311
y_2	78,9	79,13	79,53	79,74	79,84	79,99	80,44
y_3	32634	34332	36990	38400	37870	39960	43770
y_4	126,73	128,18	148,68	165,11	166,31	167,03	180,32
x_1	3,17	3,01	2,81	2,59	2,67	2,38	1,98
x_2	32133	33777	36451	38029	37042	39187	42693
x_3	3268	3461	3631	3857	4120	4315	4578
x_4	0,49	0,51	0,52	0,51	0,14	0,14	0,13
x_5	2350	2380	2469	2522	2485	2422	2540
x_6	1,1829	1,3321	1,3219	1,4408	1,5108	1,3756	1,3037
x_7	86,62	81,80	82,09	86,20	85,52	85,87	84,69
x_8	56,65	59,47	61,86	64,04	64,70	67,05	65,26
x_9	90,78	99,64	106,10	107,94	103,33	97,33	107,04
x_{10}	68,352	74,875	82,224	97,344	92,016	91,854	104,97
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
y_1	3391	3449	3527	3612	3703	3771	3842
y_2	80,54	80,49	81,09	80,64	80,99	80,99	81,4
y_3	44590	46250	48110	49010	50910	53680	54890
y_4	173,97	184,08	191,38	161,71	166,46	174,08	190,43
x_1	1,81	1,76	1,69	1,57	1,44	1,30	1,16
x_2	43564	45232	47191	47979	49921	52574	53735
x_3	4696	4945	5174	5329	5463	5748	5955
x_4	0,13	0,12	0,12	0,12	0,14	0,13	0,13
x_5	2317	2469	2576	2228	2257	2380	2563
x_6	1,2905	1,3426	1,2258	1,1045	1,0389	1,1956	1,1463
x_7	82,72	87,45	83,008	83,73	90,96	92,40	91,55
x_8	66,19	67,90	69,80	71,71	73,78	69,76	70,82
x_9	105,97	109,06	112,35	117,22	116,71	114,16	109,79
x_{10}	102,34	104,55	112,81	97,498	100,57	109,95	121,41

1. Линейная многофакторная модель

На первом этапе необходимо исключить размерность величин. Для этого рассчитаем нормированные значения критериев y_1 – y_4 :

$$y_i^*(t_k) = \frac{y_i(t_k) - \min_t y_i(t_k)}{\max_t y_i(t_k) - \min_t y_i(t_k)}, \quad (1)$$

где

¹ Сайт статистики <https://www.statista.com/>

$$t_k = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}, k = \overline{1, k} \quad (2)$$

k – период, за который доступны данные по исследуемому объекту. Затем необходимо аналогичным образом нормировать факторы $x_1 - x_{10}$.

Рассчитаем общее значение критерия y_0 на основе частных нормированных критериев $y_1 - y_4$:

$$y_0(t_k) = \sum_i^k a_i y_i(t_k); \quad (3)$$

где a_i – вес i -го критерия.

Вес каждого критерия рассчитывается:

$$a_i = \frac{1}{R_i}; \quad (4)$$

где R_i – значение ранга каждого критерия. Ранг каждого критерия определяется только с помощью комбинации частных критериев для $y_1 - y_4$ таким образом, чтобы сохранялось условие:

$$R: \sum_{k=1}^{K-1} |y(t_{k+1}) - y(t_k)| \rightarrow \min. \quad (5)$$

Это условие необходимо соблюдать, поскольку исследуется большая социально-экономическая система, и для неё резкие изменения невозможны. Данные критерии могут быть подобраны различными способами. При этом чем меньше значение ранга – тем большее влияние он оказывает на систему в целом [4, 5].

В данном исследовании значения рангов были определены методом полного перебора. Итоговые значения рангов: $R_1=1, R_2=3, R_3=2, R_4=4$.

Вес критерия и ранг имеют обратную пропорциональную зависимость, поэтому средняя зарплата имеет на объект наибольшее влияние, а расходы государства на образование – наименьшее. Это показывает, что большие зарплаты способствуют получению больших преимуществ, что не противоречит логике.

После выполнения описанной выше работы необходимо исследовать влияние отдельных факторов на исследуемый объект. Одним из способов проведения такого анализа является построение линейной многофакторной модели (ЛММ). Линейная многофакторная модель имеет вид:

$$y_0(x(t)) = c_0 + \sum_i^n c_i x_i(t), \quad (6)$$

где c_i – коэффициенты влияния i -го фактора.

Как правило, из ЛММ исключаются факторы, имеющие высокую взаимную корреляцию друг с другом [6]. Такими факторами в рассматриваемой задаче являются факторы номер 1, 2, 3 и 8, поэтому их необходимо исключить из построения ЛММ.

Коэффициенты модели определим, решая задачу минимизации квадратичной невязки:

$$S = \sum_{k=1}^K (y_0(t_k) - y(t_k)) \rightarrow \min, \quad (7)$$

где $y_0(t_k)$ – известное значение, $y(t_k)$ – расчетное значение. Задача минимизации решается методами покоординатного или градиентного спуска [7, 8].

В результате решения задачи оптимизации были получены коэффициенты влияния, представленные в табл. 2.

Коэффициенты влияния факторов для ЛММ

Таблица 2

Coefficients of factor influences for LMM

Table 2

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}
-0,2756	0	0,5594	0	0,0124	0	0,036	0	0,0585	0,1024

Значения 0 у коэффициентов означают, что они выключены из построения модели, а именно факторы c_2, c_4, c_6, c_8 . Знак коэффициента свидетельствует о положительном или отрицательном влиянии фактора на итоговый критерий. Так, например, количество безработных (c_1) оказывает

наибольшее отрицательное влияние на систему, что не противоречит здравому смыслу; количество безработных косвенно указывает на количество рабочих мест в стране, и если показатель безработицы растет (косвенно падает показатель доступных рабочих мест), значит, и влияние на систему будет отрицательным. Расходы на медицину оказывают наибольшее положительное влияние: этот показатель влияет на медицинское обслуживание, что также не противоречит здравому смыслу. Наименьшее положительное влияние оказывает цена продуктовой корзины, поскольку данные о средней зарплате по стране на исследуемом промежутке всегда выше, чем цена продуктовой корзины, поэтому данный показатель влияет на систему в меньшей степени. Коэффициенты c_7 , c_9 , c_{10} также имеют положительный коэффициент при построении модели, так как общие затраты государства на инновационные исследования, количество авиаперелетов внутри страны (косвенный показатель горизонтальной мобильности), а также возможность внешнего туризма жителей страны положительно влияют на уровень жизни.

После получения модели, а также получения значений влияния факторов необходимо попробовать спрогнозировать поведение исследуемого объекта. Для того чтобы проверить возможности полученной модели, применим метод постпрогноза, который позволяет определить горизонт прогнозирования исследуемой системы. Метод заключается в расчете реакции системы на уже известных данных [9]. Постепенно будем уменьшать количество известных лет для нахождения горизонта прогнозирования (рис. 1).

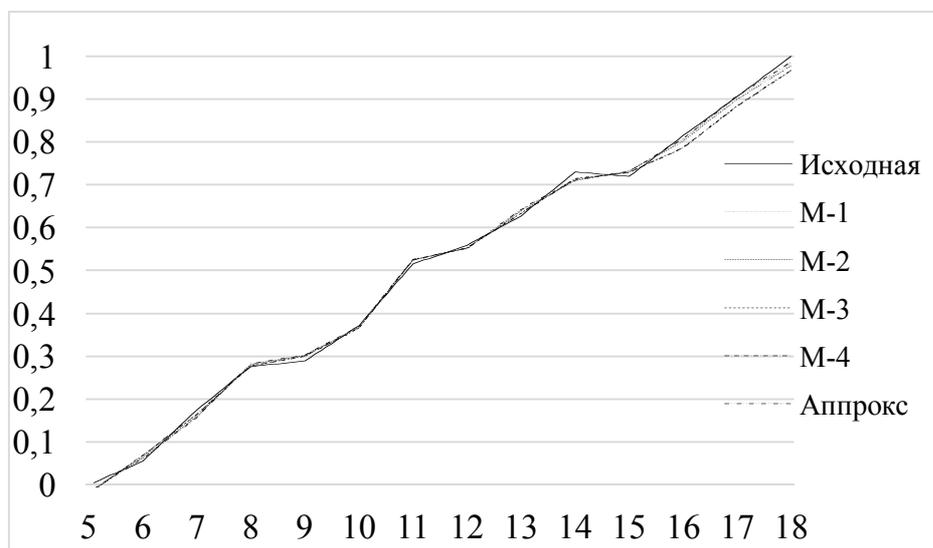


Рис. 1. Аппроксимация и постпрогноз по известным данным
Fig. 1. Approximation and post-forecast based on known data

Как видно из графика (рис. 1), модель хорошо аппроксимирует данные и строит постпрогноз, очень близкий к настоящим значениям исследуемого объекта. Поэтому воспользуемся полученной ранее моделью для прогнозирования поведения объекта на ближайшие 3 года: так как это большая социально-экономическая система, зависящая от многих факторов, то делать прогнозы на срок более 3 лет нерационально.

Для того чтобы спрогнозировать реакцию исследуемого объекта с изменением значения значащих факторов, необходимо принять допущение, что характер изменения факторов останется прежним на весь период наблюдения или хотя бы на его часть.

Поэтому определим, по какому закону изменялись факторы, и затем рассчитаем их значения с помощью соответствующих уравнений [10].

Основные законы изменения значащих факторов:

1. Факторы изменяются квадратично:

$$x(t) \approx a + b \cdot t + c \cdot t^2. \quad (8)$$

2. Факторы изменяются линейно:

$$x(t) \approx a + b \cdot t. \quad (9)$$

Изменение значений факторов не принадлежит ни к квадратичному закону, ни к линейному и происходит относительно какого-либо значения:

$$x(t) \approx \bar{x} + \Delta x. \tag{10}$$

Для того чтобы определить, по какому закону изменяются исследуемые факторы, необходимо вычислить коэффициенты линейной корреляции между полученными и исходными данными.

На следующем этапе прогнозируем поведение исследуемого объекта на ближайшие 3 года (рис. 2).

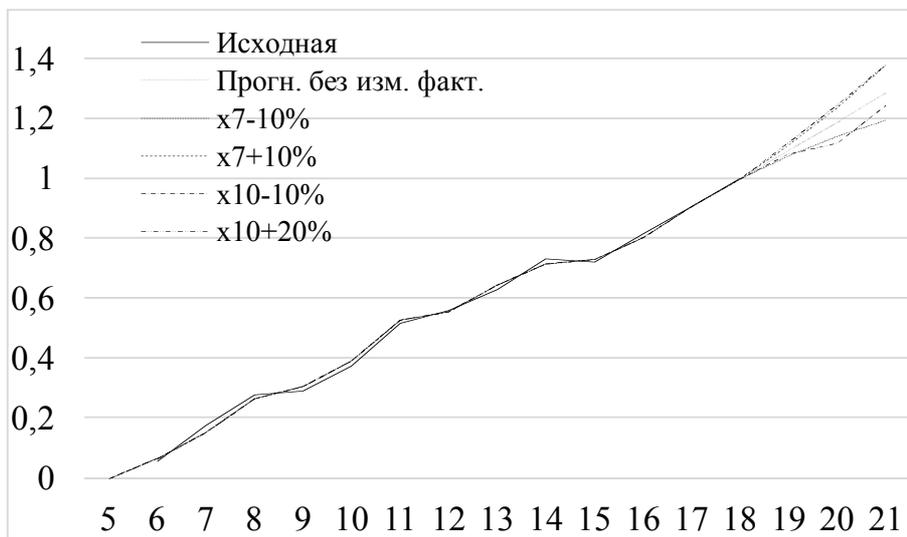


Рис. 2. Прогноз ЛММ на 3 года
Fig. 2. LMM forecast for 3 years

Оценка ИЧР Германии вырастет на 22,5 % через три года (результат на рис. 2) при условии сохранения тенденции развития факторов.

Факторы расхода на научные исследования (x_{10}) и число туристических отправлений из страны (x_7) могут быть управляемыми, так как органам власти под силу контролировать и изменять их. Оба фактора оказывают влияние на исследуемый объект при увеличении или уменьшении их больше чем на 10 % (рис. 2). В табл. 3 представлена зависимость изменения объекта от изменения факторов.

Таблица 3
Прогноз на три года при изменении управляемых факторов
Table 3
Forecast for three years with a change in managed factors

Изменение фактора / номер года	Исходные данные	1	2	3
$x_{10} + 20 \%$	1,255	1,766	2,615	3,654
$x_{10} - 10 \%$	1,255	1,51	2,1	2,7
$x_7 - 10 \%$	0,6236	-0,1169	-1,91	-4,458
$x_7 + 10 \%$	0,6236	1,364	2,132	3,225

По данным табл. 3 можно сделать вывод, что изменение фактора x_{10} на 20 % ведет к значительному увеличению значения ИЧР и такому же результату, что и изменение фактора x_7 на 10 %. Изменение же факторов в сторону уменьшения значений ведет к снижению значений системы, но система сохраняет свой рост, а не снижается.

Сравним полученные результаты при моделировании поведения системы с помощью линейной многофакторной модели с построенной далее регрессионно-дифференциальной моделью.

2. Регрессионно-дифференциальная модель

Для дальнейшего исследования рассмотрим регрессионно-дифференциальную модель (РДМ), она имеет следующий вид [11, 12]:

$$y''(t) + g \cdot y'(t) = a + b \cdot y(t) + \sum_{i=1}^m c_i \cdot x_i(t), \quad (11)$$

где g – коэффициент влияния производной первого порядка, a – константа влияния второй производной реакции при построении тренда, b – коэффициент «обратной связи», описывающий влияние значения реакции на ее же вторую производную, c_i – коэффициенты влияния факторов.

Для интерполяции годового ряда критерия используются сплайны, а не кусочно-линейные приближения, так как при интегрировании ОДУ второго порядка и выше получается гладкая кривая, на которую не оказывает влияние характер изменения значащих факторов [13, 14]. При этом будем подбирать значения факторов таким образом, чтобы исходная модель хорошо аппроксимировала данные и полученные коэффициенты имели влияние на систему с нужным знаком [15, 16].

Методом полного перебора были получены значения для коэффициентов и построена модель РДМ4 (рис. 3), она также хорошо приводит данные к исходным, но дает не противоречащие здравому смыслу коэффициенты влияния факторов (табл. 4).

Коэффициенты влияния факторов

Таблица 4

Table 4

Factors influence factors

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}
-1,63	11,3	0,16	-1,2	0,36	0,11	0,22	0	0	0,24

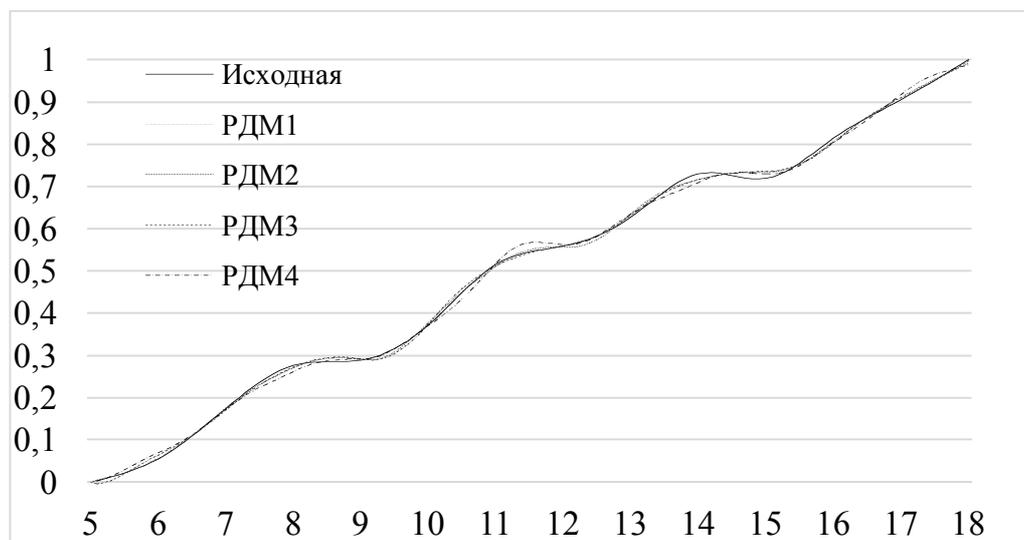


Рис. 3. РДМ
Fig. 3. RDM

Ноль означает, что факторы выключены из построения модели, а именно количество перелетов внутри страны и количество людей, имеющих доступ к сети Интернет. Видно, что ВВП на душу населения имеет наибольшее положительное воздействие, так как это показатель, отражающий экономическое развитие страны относительно своих граждан. А количество безработных – наибольшее отрицательное, так как этот показатель косвенно указывает на количество рабочих мест в стране. Также отрицательное влияние на систему оказывает количество зафиксированных преступлений, действительно этот показатель косвенно указывает на безопасность граждан страны, и чем выше уровень преступности, тем выше количество преступлений, это логично. А наименьшее положительное воздействие оказывает курс доллара к евро, это логично, поскольку евро, широко используемое в Германии, оценивается выше, чем доллар США по банковскому

курсу обмена. Также положительное влияние на поведение системы оказывают критерии c_{10} , c_7 , c_5 , c_3 . Количество вложений в инновации, а также расходы на медицину в целом положительно влияют на развитие системы, так как указывают на появление инноваций в стране и уровень медицинского обслуживания. Коэффициент туристических отправок из страны также положительно влияет на жителей страны: если возможны путешествия в другие страны, значит, финансовое состояние это позволяет. Цена продуктовой корзины положительно влияет на систему, так как имеет тенденцию к линейному уменьшению, т. е. продуктовая корзина стоит дешевле, чем раньше, что также положительно влияет на жителей, это не противоречит логике.

Теперь необходимо получить горизонт прогнозирования с помощью метода постпрогноза так же, как и ранее с ЛММ. Посмотрим, хорошо ли модель аппроксимирует данные и имеет ли большой горизонт прогнозирования (рис. 4).

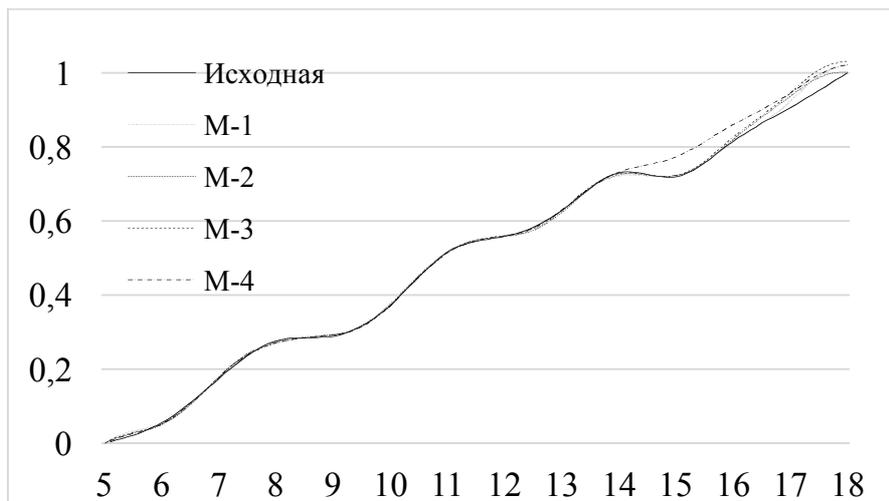


Рис. 4. Постпрогноз с уменьшением количества известных лет
 Fig. 4. Post-forecast with a decrease in the number of known years

Как видно, РДМ аппроксимирует данные хуже, чем ЛММ модель, и уже при M-4 известных лет погрешность аппроксимации значительно увеличивается, и полученная модель уже не сохраняют тенденцию модели, построенной по исходным данным по сравнению с M-3 известных лет. Это значит, что модель также позволяет строить прогнозы и её возможный горизонт прогнозирования при использовании этой модели составляет максимум 3 года (рис. 5).

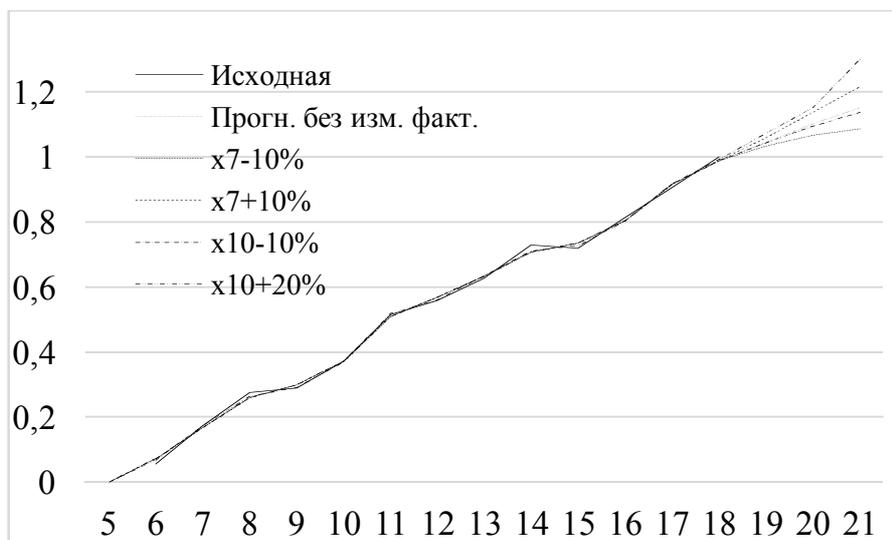


Рис. 5. Прогнозирование на 3 по РДМ
 Fig. 5. Prediction of 3 by RDM

Управление в социально-экономических системах

Если предположить, что тенденция развития факторов сохранится, то ИЧР Германии вырастет на 17 % через три года (см. рис. 5).

Для того чтобы сравнить результаты прогнозирования моделей, возьмем те же факторы, что и при построении ЛММ, с теми же процентными изменениями (см. рис. 5), а также посмотрим на значения коэффициентов (табл. 5).

Таблица 5

Прогноз на три года при изменении управляемых факторов РДМ

Table 5

Forecast for three years with a change in the controlled factors of the RDM

Изменение фактора/ номер года	Исходные данные	1	2	3
$x_{10} - 10\%$	1,255	1,026	1,055	1,088
$x_{10} + 20\%$	1,255	1,776	2,615	3,653
$x_7 - 10\%$	0,6236	-0,117	-1,91	-4,459
$x_7 + 10\%$	0,6236	1,36	2,13	3,225

В целом регрессионно-дифференциальная модель ведет себя плавнее, чем линейная многофакторная модель.

Выводы

Обе построенные модели позволяют прогнозировать ИЧР, а также исследовать влияние отдельных факторов. Сами модели ведут себя логично по отношению к изменению отдельных факторов, нет слишком больших возрастаний и слишком больших спадов относительно прогноза без изменения факторов, так как ИЧР сложный параметр, и он не может быстро увеличиваться или уменьшаться, поэтому все сделанные прогнозы закономерны и соответствуют выбранной экономической системе, а именно ИЧР. В дальнейшем прогнозировании можно пользоваться как ЛМ, так и РД моделями, они показывают схожее поведение самой модели и факторов. Если ИЧР начнет снижаться по естественным причинам, то можно воспользоваться увеличением изменяемых факторов x_7 и x_{10} для того, чтобы направить систему к росту. Если же по естественным причинам значение ИЧР будет снижаться значительно больше 6–8 %, то изменения управляемых факторов по отдельности будет недостаточно для возврата ИЧР к предыдущим значениям и его повышению. Можно сказать, что при неизменном поведении факторов модели ЛМ и РД показывают, что ИЧР будет расти и этот рост составит от 17 % до 22 % в течение ближайших трех лет. Также обе модели показывают, что при воздействии на управляемые факторы можно добиться как снижения, так и увеличения показателя ИЧР, максимального увеличения и уменьшения показателя можно добиться при изменении параметра x_{10} .

Литература

1. Спиридонов, С.П. Индекс развития человеческого потенциала как ключевой индикатор качества жизни / С.П. Спиридонов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки. – 2010. – № 11 (91). – С. 161–172.
2. Кудрявцева, С.С. Интегральные оценки качества жизни населения / С.С. Кудрявцева // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – № 9. – С. 259–264.
3. Спиридонов, С.П. Индикаторы качества жизни / С.П. Спиридонов // Современные проблемы науки. – 2011. – № 3. – С. 41–43.
4. Янченко Т.В. Определение оптимальной ранжировки частных критериев оценки краевого социального ресурса / Т.В. Янченко, А.В. Затонский // Экономика и менеджмент систем управления. – 2013. – № 4 (10). – С. 99–104.
5. Асалханов, П.Г. Линейные и нелинейные многофакторные модели в задаче прогнозирования сроков агротехнологических операций / П.Г. Асалханов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 4. № 1 (68). – С. 171–176.

6. Юкласова, А.В. Многофакторный корреляционно-регрессионный анализ рентабельности Газбанка / А.В. Юкласова, А.А. Макарова // Вестник Самарского государственного университета. Серия: Экономика и управление. – 2015. – № 9-1 (131). – С. 277–283.

7. Байковская, М.И. Метод покоординатного спуска / М.И. Байковская, А.С. Дягилев // XLII научно-техническая конференция преподавателей и студентов университета. 26–27 мая 2009 г. – Витебск, 2009.

8. Гасников, А.В. Современные численные методы оптимизации. Метод универсального градиентного спуска / А.В. Гасников. – 2-е изд. – М.: Московский физико-технический институт (государственный университет). – 2018. – 181 с.

9. Purcell, M. Prediction of household and commercial BMW generation according to socioeconomic and other factors for the Dublin region / M. Purcell, W.L. Magette // Waste Management – 2009 – vol. 29, no. 4. – P. 1237–1250.

10. Григалашвили, А.С. О применимости корреляционного анализа для исключения факторов в регрессионно-дифференциальных моделях / А.С. Григалашвили, Л.Ф. Кокиарова, И.О. Зуева // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. – Т. 22. № 1. – С. 35–44.

11. Литвинов, А.Е. Регрессионно-дифференциальное моделирование социально-экономической системы / А.Е. Литвинов // Управление инвестициями и инновациями. – 2015. – № 3. – С. 2–11.

12. Алешин, И.Ю. Интерполяция неизвестных функций кубическими сплайнами / И.Ю. Алешин, А.В. Сычева, Д.К. Агишева, Т.А. Матвеева // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-2. – С. 188–189.

13. Tchobanoglous, G. Integrated solid waste management, engineering principles and management. McGraw-Hill Series in Waste Resources and Environmental Engineering / G. Tchobanoglous, H. Theisen, S. Vigil, // New York – 1993.

14. Рогова, Т.Н. Уравнения регрессии в моделях оптимизации / Т.Н. Рогова // Мир транспорта. – 2009. – Т. 7. № 2 (26). – С. 138–143.

15. Затонский, А.В. Об аппроксимации факторов дифференциальной модели социально-экономической системы / А.В. Затонский, Н.А. Сиротина, Т.В. Янченко // Современные исследования социальных проблем (электронный научный журнал). – 2012. – № 11. – С. 6.

16. Затонский А.В. Программные средства глобальной оптимизации систем автоматического регулирования. М.: Инфра-М: ИЦ РИОР. – 2013. 136 с

Варламова Светлана Александровна, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, филиал в г. Березники, г. Березники; varlamovasa@mail.ru.

Котков Павел Викторович, магистрант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, филиал в г. Березники, г. Березники; give88@mail.ru.

Поступила в редакцию 11 июня 2020 г.

MODELING THE INDICATOR OF HUMAN POTENTIAL DEVELOPMENT IN GERMANY

S.A. Varlamova, varlamovasa@mail.ru,

P.V. Kotkov, give88@mail.ru

Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russian Federation

Introduction. The article is about a new model of the dependence of the state's human resource index on a set of factors. The human resource index does not have a global assessment methodology, but it is very important for government management. One of the methods for the formal assessment of the characteristics of a large socio-economic system is the reasonable ranking of particular criteria.

Purpose. The aim is a development of recommendations for increasing the indicators of human development index at the state level using only formal methods of mathematical modeling.

Materials and methods. Particular criteria described the human development index are selected. Their ranking is determined, which ensures the greatest smoothness of the annual trend. A set of mathematical models is designed. They are estimated both by approximating the initial data and by the quality of post-forecast. The second-order regression-differential model is chosen as the working one, its advantages and disadvantages in compare with the linear multifactor model are shown. The influence of changes in controlled and uncontrolled factors on indicators of the human development index is studied. System management features are shown.

Conclusion. Some recommendations are formulated based on short-term forecasts to improve the human development index.

Keywords: forecasting, mathematical modeling, human resource index.

References

1. Spiridonov S.P. [Index of Development of Human Potential as the Key Indicator of Life Quality]. *Bulletin of the Tambov University. Series: Humanities*, 2010, no. 11(91), pp. 161–172. (in Russ.)
2. Kudrjavceva S.S. [Integral Estimates of the Quality of Life of the Population]. *Bulletin of Kazan Technological University*, 2012, no. 9, pp. 259–264. (in Russ.)
3. Spiridonov S.P. [Life Quality Indicators]. *Modern problems of science*, 2011, no. 3, pp. 41–43. (in Russ.)
4. Janchenko T.V., Zatonkij A.V. [Determination of the Optimal Ranking of Evaluation Criteria of Regional Social Resource]. *Economics and Management Systems Management*, 2013, no. 4(10), pp. 99–104. (in Russ.)
5. Asalhanov P.G. [Linear and Nonlinear Multiple Factor Models in the Problem of Forecasting the Terms of Agrotechnological Operations]. *Bulletin of the Saratov State Technical University*, 2012, vol. 4, no. 1(68), pp. 171–176. (in Russ.)
6. Yuklasova A.V., Makarova A.A. [Multivariate correlation and regression analysis of profitability of “Gazbank”]. *Bulletin of Samara State University. Series: Economics and Management*, 2015, no. 9-1(131), pp. 277–283. (in Russ.)
7. Bajkovskaja M.I., Djagilev A.S. [Coordinate descent method]. *XLII nauchno-tehnicheskaya konferentsiya prepodavateley i studentov universiteta* [XLII scientific and technical conference of teachers and students of the university (May 26-27, 2009)]. Vitebsk, 2009, pp. 49–50. (in Russ.)
8. Gasnikov A.V. *Sovremennye chislennye metody optimizacii. Metod universal'nogo gradientnogo spуска* [Modern Numerical Optimization Methods. Universal Gradient Descent Method]. Moscow, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 2018. 181 p.
9. Purcell M., Magette W.L. Prediction of Household and Commercial BMW Generation According to Socio-Economic and other Factors for the Dublin Region. *Waste Management*, 2009, vol. 29, no. 4, pp. 1237–1250.

10. Grigalashvili A.S., Koksharova L.F., Zuyeva I.O. [Application of Correlation Analysis to Exclude Factors from Regression-Differential Models]. *Bulletin of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 35–44. (in Russ.)
11. Litvinov A.E. [Regression differential modeling of a socio-economic system]. *Investment and Innovation Management*, 2015, no. 3, pp. 2–11. (in Russ.)
12. Aleshin I.Ju., Sycheva A.V., Agisheva D.K., Matveeva T.A. [Interpolation of unknown functions by cubic splines]. *Modern high technology*, 2014, no. 5-2, pp. 188–189. (in Russ.)
13. Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S., *Integrated Solid Waste Management, Engineering Principles and Management*. New York, *McGraw-Hill Series in Waste Resources and Environmental Engineering*, 1993.
14. Rogova T.N. [Regression Equations in Optimization Models]. *World of transport*, 2009, vol. 7, no. 2(26), pp. 138–143. (in Russ.)
15. Zatonsky A.V., Sirotina N.A., Janchenko T.V. [About Approximation of Factors in Developer's Differential Model for Agriculture of Perm Region]. *Modern studies of social problems (electronic scientific journal)*, 2012, no. 11, pp. 6–6. (in Russ.)
16. Zatonsky A.V. *Programmnyye sredstva global'noy optimizatsii sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Software tools for global optimization of automatic control systems]. Moscow, *Infra-M*, 2013. 136 p.

Received 11 June 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Варламова, С.А. Моделирование показателя развития человеческого потенциала в Германии / С.А. Варламова, П.В. Котков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 85–95. DOI: 10.14529/ctcr200309

FOR CITATION

Varlamova S.A., Kotkov P.V. Modeling the Indicator of Human Potential Development in Germany. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 85–95. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200309

ФОРМИРОВАНИЕ СТРАТЕГИИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ СУБЪЕКТА РФ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

О.В. Логиновский¹, С.А. Золотых¹, А.С. Халдин²

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

² Инженерно-физический институт биомедицины г. Москва, Россия

Введение. Если до 90-х годов вопросы социально-экономического развития субъектов РФ достаточно жестко координировались и контролировались из Центра, то впоследствии федеративное начало в управлении государством дало возможность регионам проводить собственную социально-экономическую политику в зависимости от складывающихся ситуаций. Тем не менее за прошедшие тридцать лет развития регионального управления в нашей стране проблемы социально-экономического развития субъектов Российской Федерации до сих пор нуждаются в более эффективных подходах, моделях и алгоритмах.

Целью исследования является формирование стратегии социально-экономического развития отдельных субъектов РФ в современных условиях.

Материалы и методы. В составе материалов и методов можно указать на анализ подходов, методов и моделей социально-экономического развития регионов, представленных в научно-технической литературе, а также результатов их внедрения в практику управления субъектами РФ.

Результаты. В статье обосновываются основные научные положения и рекомендации по формированию стратегии социально-экономического развития регионов Российской Федерации. В том числе разработан комплекс научных положений, позволяющих осуществлять совершенствование управления социально-экономическим развитием тех или иных регионов в зависимости от складывающихся там социально-экономических ситуаций.

Заключение. Формирование стратегии социально-экономического развития субъектов РФ целесообразно осуществлять на основе научных положений и рекомендаций, упомянутых в данной статье в привязке к местным специфическим особенностям конкретного региона.

Ключевые слова: социально-экономическое развитие, регион, стратегия, модели, методы, показатели.

Введение

Существует довольно обширная научно-техническая литература, связанная с исследованием стратегического и оперативного управления регионами. Некоторые из этих работ представлены в составе библиографического списка к данной статье [1–11]. Достаточно подробно проблемы концепции, подходы и методы их решения рассмотрены в работах [3–5].

Термин «социально-экономическое развитие» по отношению к региону, как правило, употребляется в следующих сочетаниях: экономическое развитие, социально-экономическое развитие, развитие сфер жизнедеятельности региона и т. п. Под развитием в этих случаях подразумевается определенное изменение социально-экономических характеристик объекта. Эти изменения могут быть количественными, и в этом случае можно говорить о социально-экономическом росте. Если изменения качественные, то следует говорить о структурных изменениях, или об изменении содержания развития, или о приобретении социально-экономической системой новых характеристик [12–15].

Кроме изменения чисто экономических показателей рассматривают и социальные характеристики развития. Последние позволяют также оценивать степень развития того или иного региона [4].

В этой связи развитие регионов представляет собой многоаспектный процесс, который в каждом из различных регионов связан как с исходным состоянием региона, так и с особенностями его производственной структуры, географического положения, промышленной специализацией и т. д. Следует отметить, что развитие того или иного региона представляет собой некий вектор целевой направленности (имеет цель или систему целей и задач, требующих своего решения) [16–18].

Как правило, основная интегральная цель социально-экономического развития региона свя-

зана с повышением благосостояния его населения при обеспечении безопасности жизнедеятельности. Это предполагает повышение доходов населения, улучшение здоровья и продолжительности жизни, а также повышение уровня его образования.

Следует отдавать себе отчет в том, что наши сегодняшние отнюдь не выдающиеся результаты и различного рода просчеты в стратегическом государственном, региональном и корпоративном управлении базируются во многом на пренебрежении к традициям русского предпринимательства дореволюционной России, собственному опыту высокоэффективного развития народного хозяйства советского периода 1930–1960-х годов, нежеланию или неспособности извлечь уроки из плохо продуманных и организованных реформ конца 1980–1990-х годов, а также на преувеличении значения зарубежного опыта для становления рыночных отношений в современной России [12].

К особенностям сложившегося производственно-хозяйственного комплекса современной России следует отнести: территориальную разобщенность субъектов производственно-хозяйственной деятельности; диспропорции в развитии промышленных отраслей, еще более усилившиеся за годы реформ; декларативность и неконкретность многих задач по управлению страной и ее регионами; размытость ответственности на многих уровнях в структурах государственного регионального управления.

Обеспечение высоких темпов экономического роста является для России и ее регионов важнейшей задачей стратегического значения. Будущее страны напрямую зависит от того, насколько удастся перевести ключевые отрасли промышленного производства на уровень экономически высокоразвитых государств. России просто необходимо добиться опережающих западные страны экономических показателей и результатов. К сожалению, сегодня в экономике и промышленности РФ существует явный перекос в сторону развития добывающих отраслей и металлургических производств низких переделов. В этой связи темпы обновления машиностроительного комплекса и важнейших высокотехнологичных производств при существующей динамике ни в ближайшие годы, ни в отдаленном будущем не позволят России занять сколь-нибудь заметное место в мировом рейтинге промышленно развитых стран.

Для ликвидации подобного отставания Правительством Российской Федерации в 2020 году принята программа «Сводная стратегия развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2024 года и на период до 2035 года» (распоряжение Правительства РФ от 6 июня 2020 г. № 1512-р).

1. Цели, критерии, факторы социально-экономического развития региона

Целям и задачам развития регионов должна соответствовать система критериев (характеристик развития) и моделей, которые позволяют обеспечить улучшение соответствующих социально-экономических показателей развития региона.

Наиболее известным способом оценки экономического развития региона является оценка уровня его производственного потенциала.

Международные организации оценивают степень развития стран и регионов по некоторым универсальным интегральным показателям. Одним из таких показателей является индекс развития человеческого потенциала, разработанный в рамках «Программы развития» ООН.

Отметим, что критерии экономического развития не всегда играют роль целей или целевых ориентиров и наоборот. Нередко в качестве тактических целей регионального развития выступают промежуточные задачи по изменению неблагоприятных ситуаций и созданию условий, необходимых для успешного развития. Среди таких тактических целей развития региона можно назвать:

- привлечение новых видов бизнеса;
- расширение существующего бизнеса;
- развитие малого бизнеса;
- развитие промышленности;
- развитие сферы услуг;
- повышение уровня занятости населения региона.

Особое значение в определении уровня экономического развития региона имеют традиционные показатели, оценивающие уровень производства и потребления благ и рост этого уровня в расчете на душу населения (валовой региональный доход (ВРД), валовой региональный продукт (ВРП), реальный ВРП на душу населения, темпы роста этих показателей) [4].

Для оценки динамики развития целесообразно использовать показатели, отражающие темпы экономического роста в регионе. В первую очередь, это темпы роста душевого дохода, производительности труда, а также темпы структурной трансформации производства и общества. Воздействие на темпы экономического роста – жизненно важный вопрос для экономической политики как страны в целом, так и отдельного региона. Прогрессивная последовательная динамика количественных показателей экономического роста является основным фактором устойчивого развития.

Оценить динамику развития региона можно на основе наиболее адекватных следующих критериев и соответствующих им показателей социально-экономического развития:

- ВРД или ВРП (абсолютная величина и на душу населения) и темпы роста этих показателей;
- средний уровень доходов населения и степень их дифференциации;
- продолжительность жизни, уровень физического и психического здоровья людей;
- уровень образования;
- уровень потребления материальных благ и услуг (продуктов питания, жилья, услуг связи и т. п.), обеспеченность домашних хозяйств товарами длительного пользования;
- уровень здравоохранения (обеспеченность поликлиниками, больницами, аптеками, диагностическими центрами и услугами скорой помощи, качество предоставляемых медицинских услуг);
- состояние окружающей среды;
- равенство возможностей людей, развитие малого бизнеса;
- обогащение культурной жизни людей.

При управлении социально-экономическим развитием отдельного региона целесообразно выделять вышеперечисленные относительно самостоятельные цели и осуществлять мониторинг их достижения. Наиболее значимыми в этом отношении могут выступать такие параметры оценки уровня регионального развития, как наличие и качество школ, детских садов, других образовательных учреждений и их доступность, снабжение продуктами питания, контроль их качества, соблюдение прав потребителей на розничном рынке [3].

В научно-технической литературе представлены несколько теорий, анализирующих и объясняющих действие основных факторов экономического развития регионов и городов [3–5].

Одной из таких теорий является теория пространственных преимуществ, или теория размещения, согласно которой пространственные преимущества проявляются в любой экономической деятельности. Эти преимущества заставляют те или иные виды производств располагаться во вполне определенных регионах. Например, любые производства, сильно зависящие от сырья и других материальных ресурсов, располагаются, как правило, близко к местам их добычи. Например, металлургические заводы тяготеют к местам добычи железной руды и кокса, алюминиевые производства – к источникам дешевой электроэнергии. Некоторые массовые производства (особенно товаров массового спроса), ориентированные на местные рынки, требующие широкой сети распространения, а потому и значительных транспортных издержек, стремятся дислоцироваться поблизости рынков сбыта.

Таким образом, каждый регион или город обладает своими территориальными преимуществами, связанными либо с источниками сырья, либо с другими факторами производства (рабочая сила, земля, электроэнергия), либо с близостью к рынкам сбыта. Данная теория в значительной степени объясняет сложившиеся региональные различия размещением производительных сил.

Иные традиционные представления о социально-экономическом развитии регионов, связанные не только с теорией, но и с практикой экономического развития, основываются на закономерностях агломераций, концентраций и комбинаций производств. В крупных городах или городских агломерациях дополнительная экономия или дополнительный экономический эффект образуется в этой связи благодаря тому, что вокруг успешно действующих производств формируется их окружение. Благодаря объединенному использованию общих ресурсов (трудовых, энергетических, инфраструктурных) достигается дополнительная экономия. Высокая концентрация промышленности в крупных городах позволяет получить дополнительную экономию как результат агломерационного эффекта: совокупные производственные затраты крупной агломерации меньше, чем сумма затрат каждого производства в случае их одиночного размещения вне пределов данной агломерации. Дополнительный потенциал развития крупных центров возникает также в связи с тем, что только здесь возможна эффективная эксплуатация некоторых видов вы-

сококвалифицированной деятельности: особые виды медицинского обслуживания, музейная и театральная жизнь, автотехобслуживание и др.

Известной концепцией, позволяющей эффективно анализировать проблемы экономического развития региона, является концепция основного и вспомогательного производства. В любом регионе можно выделить отрасли базовой промышленности, то есть те, продукция которых в основном вывозится из региона, и вспомогательное производство, продукция которого потребляется преимущественно в пределах региона. Обычно при расширении основного производства увеличиваются и вспомогательные производства, а также вся обслуживающая его инфраструктура. Возникает так называемый мультипликативный эффект: основное производство становится своеобразным ускорителем экономического роста. Как правило, в качестве основного производства выступают такие локомотивы индустрии, как предприятия металлургии, машиностроения, химии.

Основное производство может быть не только ускорителем, но и тормозом развития, в частности, в том случае, когда количество рабочих мест в основном производстве сокращается в ходе структурной перестройки.

При достаточно быстрых структурных сдвигах, обусловленных научно-техническим прогрессом, главным фактором успешного развития региона становится не основное, а вспомогательные производства. Долгосрочное процветание региона зависит от того, насколько развита в нем инфраструктура и насколько готова она взять на себя нагрузку нового основного производства. Чем больше развита инфраструктура (вспомогательное производство), тем более гибкой является вся экономика региона.

Таким образом, в условиях быстрой смены основных производств главным фактором устойчивого экономического развития становится степень развитости всей городской инфраструктуры. Это дает основание по-новому взглянуть на роль так называемых вспомогательных производств, оценить их как первичный фактор экономического развития и залог его процветания в будущем.

При анализе качества регионального развития полезно использовать концепцию стадий роста, предложенную американским социологом и экономистом Д. Беллом. В соответствии с его классификацией все общественное производство подразделяется на три сектора: первичный, вторичный и третичный [4]. К первичному сектору относится сельское хозяйство, добыча полезных ископаемых, рыболовство и лесоводство, то есть те виды деятельности, которые связаны преимущественно с природными ресурсами. К вторичному сектору относятся отрасли, занятые обработкой добытых ресурсов: металлургия, машиностроение и металлообработка, химия и нефтехимия, легкая и пищевая промышленность, энергетика, строительство и пр. К третичному сектору относятся наука, искусство, телекоммуникации, производство программного обеспечения, оборона, торговля, медицинское обслуживание, образование, административное управление и другие виды услуг.

2. Роль и особенности государственного управления при переходе к устойчивому развитию регионов

Важно понимать, что ни масштабы экономики, ни численность населения страны, ни ее политический вес в мире, ни обеспеченность природными ресурсами, ни географическое положение, ни величина зарубежной помощи, ни объемы иностранных кредитов не являются факторами, обеспечивающими начало экономического роста и дальнейшего устойчивого развития. Более важным фактором является социально-экономическая политика. Именно желание и умение власти владеть этим инструментом, добиться эффективности экономики, финансовой стабилизации, проводить нацеленную на результаты стратегию развития страны и ведет социально-экономическое развитие регионов в позитивном направлении.

Проблема социально-экономического развития регионов особенно актуальна в современных условиях.

Сегодня необходимы новые качественные научно-технические разработки по социально-экономическому развитию различных субъектов РФ, обеспечивающие подъем их производственного и ресурсного потенциала с использованием актуальных технологий цифровизации и внедрением математических методов и моделей. Определение перспективных путей, методов и средств необходимого экономического роста, оптимизации внешних и внутренних экономических пропорций должно быть осуществлено не только на уровне государства в целом, но и на уровне всех субъектов РФ. При этом необходимо четко осознавать, что наиболее значимыми

факторами снижения эффективности экономики являются опасность физического разрушения основных фондов, отказ от усиления государственного регулирования и стимулирования производств, пренебрежения социальными проблемами населения.

Таким образом, регионам России необходима не декларативная, а продуманная, тщательно разработанная концепция социально-экономического развития субъектов РФ, выполненная не в виде набора благих пожеланий, а как комплексная разработка их эффективного развития в современных условиях.

Опорой этой новой концепции должны стать существующие факторы, определяющие весь значительный потенциал государства и регионов (природно-ресурсный, производственный, технический, энергетический, инфраструктурный и др.).

При этом важно обеспечить также стабилизацию и улучшение экологической ситуации в стране и ее отдельных (проблемных) регионах, использования преимуществ внутренних ресурсов России, прежде всего интеллектуального и научного потенциала, развития высокотехнологических производств, ВПК и т. д.

Следует оказывать государственную поддержку развитию высокоэффективных производств, отказаться от реализации проектов, способных нанести ущерб окружающей среде, либо последствия и осуществление которых недостаточно ясны.

При этом совершенно необходимо обеспечить достойный уровень жизни людей, экологическую чистоту и конкурентоспособность продукции, адаптацию производственного потенциала к изменениям рыночной конъюнктуры на базе модернизации производств как условия повышения экономической эффективности и предотвращения чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

Все это не исключает того, что в отдельных регионах Российской Федерации темпы и сроки преобразований могут быть более быстрыми. Требование общей направленности стратегии регионов в кратко-, среднесрочной и долгосрочной перспективах должны четко согласовываться с конкретными социально-экономическими параметрами развития государства в целом [4].

При этом стратегическое управление регионами должно давать ориентиры для развития крупнейших промышленных предприятий и иных хозяйствующих субъектов городов и территорий, а также определять стратегические приоритеты для органов местного самоуправления.

Отметим, что большинство научных разработок в области государственного управления в субъектах РФ не нацелено на комплексное решение наиболее важных вопросов социально-экономического развития регионов. В результате регулирующие воздействия органов государственной власти на производственные процессы связаны в основном с запретительными, фискальными мерами, а само государственное региональное управление имеет ситуационный характер и не позволяет планировать и осуществлять решение значительных стратегических задач даже на достаточно близкую перспективу [12].

Сегодня для повышения эффективности управления регионами нужна продуманная современная целостная система управления социально-экономическим развитием территорий, в задачи которой входит не простой мониторинг деятельности промышленных предприятий и других хозяйствующих субъектов, а обеспечение увеличения темпов роста промышленного производства и других показателей территориально-производственной динамики. Достижение этой цели невозможно без всестороннего научного обоснования концепции и технологии создания подобной системы.

Формирование стратегии социально-экономического развития субъектов РФ в современных условиях целесообразно осуществлять в соответствии с алгоритмом, представленным в монографии «Эффективное управление организационными и производственными структурами» (под редакцией профессора О.В. Логиновского) [5].

Заключение

В современных условиях жизнедеятельности субъектов РФ, характеризующихся политической, экономической и социальной нестабильностью, а также возрастающими сложностями в ведении бизнеса по комплексу разнообразных причин (холодные и гибридные войны, санкции, угрозы революций и смен политических режимов, расшатывание государственных устоев во многих странах, кризисы различного вида ресурсов, нестабильность международных рынков, эпидемиологические войны и др.), значение стратегического управления социально-экономическим развитием регионов существенно выросло.

Рассмотренные в данной статье вопросы стратегического управления регионами должны помочь органам государственной власти субъектов РФ более комплексно осмыслить сложившееся положение дел, практику выработки государственных региональных стратегий, усовершенствовать процессы создания собственных стратегических приоритетов, программ, а также проектов, которые позволят существенно повысить эффективность регионального управления.

Литература

1. Гапоненко, А.Л. Стратегия социально-экономического развития: страна, регион, город / А.Л. Гапоненко. – М.: Омега. – 2012. – 327 с.
2. Глазьев, С.Ю. Развитие российской экономики в условиях глобальных технологических сдвигов: научный доклад / С.Ю. Глазьев. – М.: НИР, 2007. – 134 с.
3. Логиновский, О.В. Региональные органы государственной власти России в условиях преобразования системы управления: монография / О.В. Логиновский, Н.М. Рязанов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 519 с.
4. Логиновский, О.В. Управление развитием региона: научное издание. / О.В. Логиновский, Н.М. Рязанов. – М.: «Машиностроение», 2006. – Т. 3. – 560 с.
5. Эффективное управление организационными и производственными структурами: монографии / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др.; под ред. О.В. Логиновского. – Москва: ИНФРА-М. Серия «Научная мысль», 2020. – 450 с.
6. Томпсон, А.А. Стратегический менеджмент: концепции и ситуации для анализа / А.А. Томпсон, А.Дж. Стрикленд; пер. с англ. – М.: Вильямс, 2007. – 928 с.
7. Управление социально-экономическим развитием России: концепции, цели, механизмы / рук. авт. кол.: Д.С. Львов, А.Г. Поршнев; Гос. ун-т упр., Отд-ние экономики РАН. – М.: ЗАО «Изд-во Экономика», 2002. – 702 с.
8. Уткин, Э.А. Государственное и региональное управление / Э.А. Уткин, А.Ф. Денисов. – М.: ИКФ «ЭКМОС», 2002. – 320 с.
9. Introduction to theory of control in organizations. Boca Ra-ton / V. Burkov, M. Goubko, N. Korgin, D. Novikov. – USA: CRC Press, 2015. – 346 p.
10. Burkov, V.N. Control Mechanisms for Ecological- Economic Systems / V.N. Burkov, D.A. Novikov, A.V. Shchepkin. – Berlin: Springer, 2015. – 174 p.
11. Global Economic Instability and Management of Industrial Organisations / К.А. Korennaya, О.В. Loginovskiy, А.А. Maksimov, А.В. Zimin; Ed.by А.Л. Shestakov. – Kostanay: Kostanay State University by A. Baitursynov Press. – 230 p.
12. Минцберг, Г. Школы стратегий / Г. Минцберг, Б. Альстрэнд, Дж. Лэмвелл. – СПб.: Питер, 2002. – 336 с.
13. Новиков, Д.А. Теория управления организационными системами / Д.А. Новиков. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 2012. – 604 с.
14. Стратегический ответ России на вызовы нового века / под общ. ред. Л.И. Абалкина. – М.: «Экзамен», 2004. – 608 с.
15. Сценарий и перспективы развития России / под ред. В.А. Садовниченко и др. – М.: ЛЕНАНД, 2011. – 320 с.
16. Хелд, Д. Глобальные трансформации: политика, экономика, культура / Д. Хелд; пер. с англ. В.В. Сапова и др. – М.: Практикс, 2004. – 576 с.
17. Бурков, В.Н. Механизмы управления: Управление организацией: планирование, организация, стимулирование, контроль: уч. пособие / В.Н. Бурков, И.В. Буркова, М.В. Губко; под ред. Д.А. Новикова. – М.: ЛЕНАНД, 2013. – 216 с.
18. Логиновский, О.В. Стратегическое управление регионами: от сложившихся подходов к учету современных реалий / О.В. Логиновский, А.А. Максимов // Проблемы управления. – 2017. – № 6. – С. 19–31.

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; loginovskiyo@mail.ru.

Золотых Светлана Анатольевна, аспирант кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; zsa-250270@mail.ru.

Халдин Александр Сергеевич, магистр, Инженерно-физический институт биомедицины, г. Москва; sanya_74rus@list.ru.

Поступила в редакцию 28 июня 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr200310

FORMATION OF THE STRATEGY OF SOCIO-ECONOMIC DEVELOPMENT OF THE SUBJECT OF THE RUSSIAN FEDERATION IN MODERN CONDITIONS

O.V. Loginovskiy¹, loginovskiyo@mail.ru,

S.A. Zolotykh¹, zsa-250270@mail.ru,

A.S. Khaldin², sanya_74rus@list.ru.

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² Engineering Physics Institute of Biomedicine, Moscow, Russian Federation

Introduction. If until the 90s the issues of socio-economic development of the constituent entities of the Russian Federation were rather tough, then they had to be monitored and controlled from Central Europe, and then at the federal level in management in order to be able to use socio-economic policy depending on the emerging situations. The problems of the existence of the socio-economic development of the constituent entities of the Russian Federation still need more effective approaches, models and algorithms.

Aim of the study is to form a strategy for the socio-economic development of individual subjects of the Russian Federation in modern conditions.

Materials and methods. As part of the materials and methods, one can point to the analysis of approaches, methods and models of socio-economic development of regions presented in the scientific and technical literature, as well as the results of their implementation in the practice of managing the subjects of the Russian Federation.

Results. The article substantiates the main scientific provisions and recommendations for the formation of a strategy for the socio-economic development of the regions of the Russian Federation. In particular, a set of scientific provisions has been developed that allow for the improvement of the management of the socio-economic development of certain regions, depending on the socio-economic situations developing there.

Conclusion. It is advisable to form a strategy for the socio-economic development of the constituent entities of the Russian Federation on the basis of scientific provisions and recommendations mentioned in this article in relation to the local specific features of the region.

Keywords: socio-economic development, region, strategy, models, methods, indicators.

References

1. Gaponenko A.L. *Strategiya sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya: strana, region, gorod* [Socio-Economic Development Strategy: Country, Region, City]. Moscow, Omega, 2012. 327 p.
2. Glazyev S.Yu. *Razvitiye rossiyskoy ekonomiki v usloviyakh global'nykh tekhnologicheskikh sdvigov: nauchnyy doklad* [Development of the Russian Economy in the Context of Global Technological Shifts: Scientific Report]. Moscow, NIR, 2007. 134 p.

3. Loginovskiy O.V., Ryazanov N.M. *Regional'nyye organy gosudarstvennoy vlasti Rossii v usloviyakh preobrazovaniya sistemy upravleniya* [Regional Bodies of State Power of Russia in the Conditions of Transformation of the Management System]. Yekaterinburg, UB RAS, 2003. 519 p.
4. Loginovskiy O.V., Ryazanov N.M. *Upravleniye razvitiyem regiona: nauchnoye izdaniye. Vol. 3.* [Regional Development Management: Scientific Publication. vol. 3]. Moscow, "Mechanical engineering", 2006. 560 p.
5. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *Effektivnoye upravleniye organizatsionnymi i proizvodstvennymi strukturami* [Effective Management of Organizational and Production Structures]. Moscow, INFRA-M, 2020. 450 p.
6. Thompson A.A., Strickland A.J. *Strategicheskiy menedzhment: kontseptsii i situatsii dlya analiza* [Strategic Management: Concepts and Situations for Analysis]. Moscow, Williams, 2007. 928 p.
7. L'vov D.S., Porshnev A.G. *Upravleniye sotsial'no-ekonomicheskimi razvitiyem Rossii: kontseptsii, tseli, mekhanizmy* [Management of Social and Economic Development of Russia: Concepts, goals, Mechanisms]. Moscow, ZAO Publishing House of Economics, 2002. 702 p.
8. Utkin E.A., Denisov A.F. *Gosudarstvennoye i regional'noye upravleniye* [State and Regional Management]. Moscow, IKF "EKMOS", 2002. 320 p.
9. Burkov V., Goubko M., Korgin N., Novikov D. *Introduction to Theory of Control in Organizations*. Boca Raton, CRC Press, 2015. 346 p.
10. Burkov V. N., Novikov D. A., Shchepkin A.V. *Control Mechanisms for Ecological-Economic Systems*. Berlin, Springer, 2015. 174 p.
11. Korennaya K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Zimin A.V. *Global Economic Instability and Management of Industrial Organisations*. Kostanay, *Kostanay State University by A. Baitursynov Press*. 230 p.
12. Mintzberg G., Alstrand B., Lampel J. *Shkoly strategiy* [Schools of Strategies]. St. Petersburg, Peter, 2002. 336 p.
13. Novikov D.A. *Teoriya Upravleniya Organizatsionnymi Sistemami* [Theory of Management of Organizational Systems]. Moscow, Publishing house of physical and mathematical literature, 2012. 604 p.
14. *Strategicheskiy otvet Rossii na vyzovy novogo veka* [Russia's Strategic Response to the Challenges of the New Century]. Moscow, "Exam", 2004. 608 p.
15. Sadovnichy V.A. *Stsenariy i perspektivy razvitiya Rossii* [Scenario and Development Prospects for Russia]. Moscow, LENAND, 2011. 320 p.
16. Held D. *Global'nyye transformatsii: politika, ekonomika, kul'tura* [Global Transformations: Politics, Economics, Culture]. Moscow, Praxis, 2004. 576 p.
17. Burkov V.N., Burkova I.V., Sponge M.V. *Mekhanizmy upravleniya: upravleniye organizatsiyey: planirovaniye, organizatsiya, stimulirovaniye, kontrol'* [Management Mechanisms: Organization Management: Planning, Organization, Stimulation, Control]. Moscow, LENAND, 2013. 216 p.
18. Loginovskiy O.V., Maximov A.A. [Strategic Management of Regions: from the Prevailing Approaches to Accounting for Modern Realities]. *Control problems*, 2017, no. 6, pp. 19–31.

Received 28 June 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Логиновский, О.В. Формирование стратегии социально-экономического развития субъекта РФ в современных условиях / О.В. Логиновский, С.А. Золотых, А.С. Халдин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 96–103. DOI: 10.14529/ctcr200310

FOR CITATION

Loginovskiy O.V., Zolotykh S.A., Khaldin A.S. Formation of the Strategy of Socio-economic Development of the Subject of the Russian Federation in Modern Conditions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 96–103. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200310

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

DOI: 10.14529/ctcr200311

COMPUTATIONAL MODELING OF LIQUID FILM FLOW REGIMES IN HEAT AND MASS TRANSFER DEVICES AT LOW REYNOLDS NUMBERS

L.A. Prokudina, prokudinala@susu.ru,

M.P. Vikhrev, rizvanovk@bk.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Introduction. Heat and mass transfer devices based on flow of a thin layer of viscous fluid are widely used in numerous industry fields (chemical, petrochemical, energy, food, etc.). Falling film devices (film rectifiers, absorbers, steam generators, etc.) efficiency is related to large contact surface area and low liquid flow rate.

Aim. Numerical study of wave characteristics of a thin layer of a viscous liquid both during free flow and during evaporation.

Materials and methods. This work presents results of computational modeling of vertical water liquid film flow at low Reynolds numbers in the framework of partial differential equation of the state of the free surface of the liquid film. Equation coefficients include different physicochemical factors such as surface tension parameter and temperature gradients influence parameter. Analytic dependence of Marangoni parameter critical values is presented. Liquid film flow is investigated both at free flow and at evaporation of liquid. Temperature gradients influence causing increase of instability region and changing parameters of liquid film wave flow is taken into account. Utility developed in C++ is used for computation of wave characteristics and instability regions of liquid films.

Results. Computational experiments were carried out for the vertical water film both at free flow and at evaporation. As a result of computational experiments liquid film flow regimes with a maximum value of the increment were selected; such regimes are shown in experimental studies of other researchers. Marangoni parameters critical values, at which destruction of film is possible, were calculated.

Conclusion. Increment increases and phase velocity decreases under conditions of evaporation, and conditions are created for the destruction of the liquid film in heat and mass transfer devices and formation of “dry spot” on their surface. Liquid films flows investigation is relevant due to wide use of industrial falling film devices based on evaporating liquid films (evaporators, vaporizing apparatus); its results could be used in the design or modernization of existing equipment and in the design of technological processes in liquid films.

Keywords: liquid film, evaporation, instability, Marangoni parameter, low Reynolds numbers.

Introduction

First experimental and theoretical studies of the flow of a thin viscous liquid layer we carried out by P.L. Kapitza [1, 2]. Liquid film is an effective tool of interfacial heat and mass transfer due to large contact surface area and low liquid flow rate [3–5], so it is widely used in industry. Falling film devices are used for working with substances, that can only be processed in thin layers: manufacture of certain types of plastics, evaporation of food products, that are sensitive to high temperatures, heating up and concentrating of substances, that can be burnt or polymerized at prolonged contact with heating surface. Also falling film evaporators and distillers are widely used in manufacture of chemical and food products. Due to short contact with heating surface, these devices save chemical properties of substances and vitamins of food products [4].

Influence of different physicochemical factors on liquid film flow regimes should be considered when designing falling film devices [6, 7]. Due to wide use of industrial falling film devices based on evaporating liquid films (evaporators, vaporizing apparatus), investigation of liquid films flows at evaporation of liquid are relevant.

The aim of this work is numerical study of wave characteristics of a thin layer of viscous fluid at free flow and evaporation of liquid.

1. Formulation of the problem

We consider the flow of a thin viscous liquid layer with a thickness δ at Reynolds numbers $1 \leq Re \leq 5$ on a vertical solid heated surface in the coordinate system OXY as shown on fig. 1.

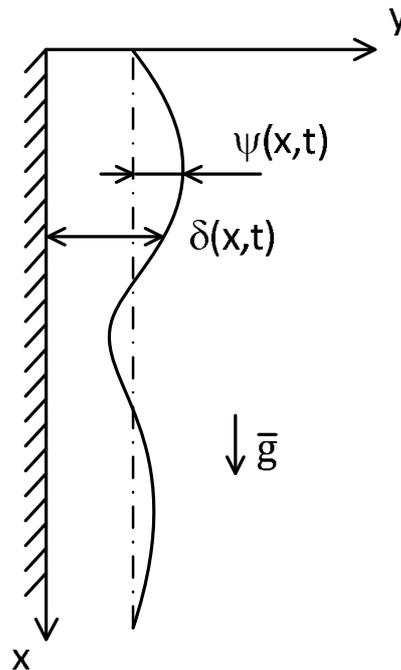


Fig. 1. Flowing liquid film model

Denote deviation of the liquid film free surface from the undisturbed state by $\psi(x, t)$. Taking into account, that surface tension σ is a function of liquid temperature T and liquid film surface chemical composition [8, 9], we introduce dimensionless parameter

$M = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial y} \right)_{y=\delta} \frac{1}{u_0^2 \rho}$, called Marangoni number, where u_0 – fluid flow average velocity, ρ – fluid density.

2. Mathematical model of liquid film free surface state

Liquid film free surface state is described by following partial differential equation [0]:

$$\left(\frac{1}{RePrKu} - \frac{1}{RePrKu} \psi \right) + \left(a_7 \frac{\partial}{\partial x} - 1 \right) \frac{\partial \psi}{\partial t} + a_1 \frac{\partial^4 \psi}{\partial x^4} + a_6 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + a_{11} \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

where

$$a_1 = -\frac{\sigma Re}{3}, a_6 = -\frac{ReM}{2} + \frac{3}{40} Re^3 F_x^2 + \frac{2}{3} \frac{Re \text{sign } \Delta T}{(RePrKu)^2},$$

$$a_7 = \frac{5}{24} Re^2 F_x, a_{11} = -Re F_x,$$

Re – Reynolds number, F_x – Froude number, Ku – Kutateladze number, Pr – Prandtl number, $\text{sign}\Delta T = 0$ corresponds to free flow regime and $\text{sign}\Delta T = -1$ corresponds to evaporation process.

In heat and mass transfer processes, including liquid film evaporation process, high temperature gradients could cause destruction of liquid film and formation of “dry spot” on film device surface. Marangoni parameter critical values, at which destruction of film is possible, are given by the following formula [0]:

$$M_{\kappa} = \frac{3}{20} Re^2 F_x^2 - \frac{2}{Re k_x^2} \left(b_0 - \frac{b_1}{b_2} \right) + \frac{4 \text{sign} \Delta T}{3(Re Pr Ku)^2}, \quad (2)$$

where $b_0 = a_1 k_x^4$, $b_1 = -a_{11} k_x$, $b_2 = a_7 k_x$.

3. Computational experiments

Using the solution type $\psi = A \exp[i(k_x x - \omega t)]$ of equation (1) we obtain the following dispersion equation:

$$\omega(a_7 k_x + i) + a_1 k_x^4 - a_6 k_x^2 + a_{11} i k_x = 0, \quad (3)$$

where $\omega = \omega_r + i\omega_i$ (ω_r – frequency, ω_i – increment).

Separating (3) into real and imaginary parts we obtain solutions for frequency and increment:

$$\omega_r = \frac{Y - XZ}{1 + Z^2}, \quad (4)$$

$$\omega_i = X + \omega_r Z, \quad (5)$$

where $X = a_1 k_x^4 - a_6 k_x^2$, $Y = -a_{11} k_x$, $Z = a_7 k_x$.

Phase velocity values could be calculated by the following formula:

$$c_r = \frac{\omega_r}{k}. \quad (6)$$

Computational experiments were carried out for the vertical water film at Reynolds numbers $1 \leq Re \leq 5$ and wave numbers $0 \leq k \leq 0.5$. Liquid film free flow and evaporation process were studied.

C++ utility, calculating frequency, increment, phase velocity and Marangoni number critical values by formulas (4)–(6) and (2) was developed.

Flow of vertical water film is unstable at positive increment values (table 1). Liquid film flow is more unstable at evaporation.

Table 1
Instability regions

Re	k	
	$\text{sign}\Delta T = 0$	$\text{sign}\Delta T = -1$
1	[0; 0.0272]	[0; 0.029]
2	[0; 0.0484]	[0; 0.0492]
3	[0; 0.0679]	[0; 0.0684]
4	[0; 0.0862]	[0; 0.0866]
5	[0; 0.1038]	[0; 0.1041]

Results of calculation of increment values at $Re = 3$ are shown on fig. 2.

Flow instability region at $Re = 3$ corresponds to $0 \leq k \leq 0,0679$ range at free flow and $0 \leq k \leq 0,0684$ at evaporation. Increment curve inflection point $k = 0,025$ and maximum increment points $k = 0,0478$ at free flow and $k = 0,0482$ at evaporation could be noted.

Results of calculation of phase velocity values at $Re = 3$ in instability region are shown on fig. 3. It could be noted that evaporation leads to small decrease of phase velocity.

Maximum increment values and corresponding phase velocity values at different Reynolds numbers are presented in table 2.

Evaporation leads to increase of maximum increment values and decrease of corresponding phase velocity values in whole considered Reynolds numbers range.

Marangoni parameter critical values, calculated at maximum increment values for different Reynolds numbers, are presented in table 3.

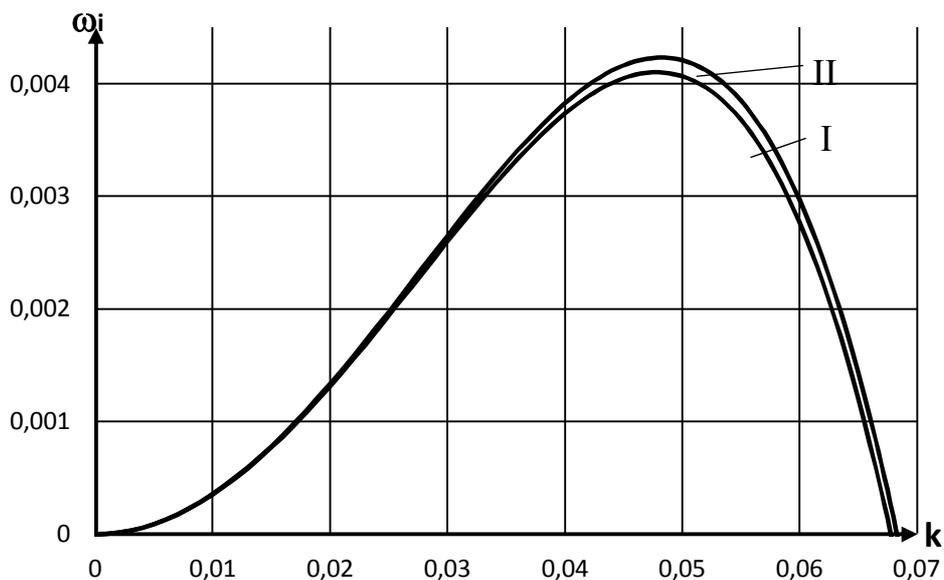


Fig. 2. Increment at $Re = 3$: I – $\text{sign}\Delta T = 0$, II – $\text{sign}\Delta T = -1$

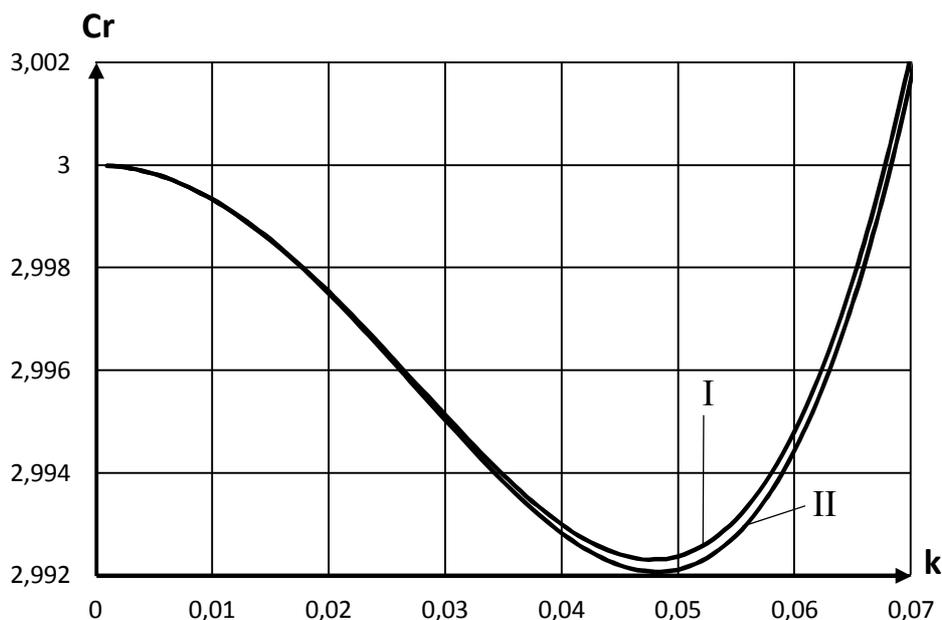


Fig. 3. Phase velocity at $Re = 3$: I – $\text{sign}\Delta T = 0$, II – $\text{sign}\Delta T = -1$

Increment and phase velocity

Table 2

Re	$\text{sign}\Delta T = 0$			$\text{sign}\Delta T = -1$		
	k	$\omega_{i \max}$	$C_{r \max}$	k	$\omega_{i \max}$	$C_{r \max}$
1	0.0192	0.000221	2.99986	0.0205	0.000287	2.99982
2	0.0342	0.001401	2.99825	0.0348	0.0015	2.99813
3	0.0478	0.004104	2.9923	0.0482	0.004231	2.99207
4	0.0606	0.008709	2.97823	0.0608	0.008859	2.97785
5	0.0725	0.015357	2.95201	0.0727	0.015524	2.95149

Table 3

Re	Critical values of Marangoni parameter		sign $\Delta T = -1$	
	sign $\Delta T = 0$		sign $\Delta T = -1$	
	k	M _к	k	M _к
1	0.0192	26044.2	0.0205	22845.9
2	0.0342	2054.46	0.0348	1984.28
3	0.0478	469.388	0.0482	461.655
4	0.0606	165.92	0.0608	164.834
5	0.0725	75.5772	0.0727	75.1689

Liquid film flow regimes with a maximum value of the increment are observed to occur in practical experiments [3] and parameters of such flow regimes are necessary for designing of technological processes in liquid films.

Conclusion

1. Mathematical model of free surface state of viscous fluid thin layer at low Reynolds numbers at free flow and evaporation of liquid is presented.
2. Results of numerical study of liquid film flow regimes are presented. Liquid film flow is unstable at $1 \leq Re \leq 5$. Wave characteristics (frequency, increment and phase velocity), instability regions and Marangoni parameter critical values of viscous fluid thin layer flow at free flow and evaporation are calculated.
3. Evaporation is more unstable process and it causes increase of increment and decrease of the phase velocity, as well as the critical value of the Marangoni parameter, which can lead to the destruction of the liquid film during heat and mass transfer.

References

1. Kapitza P.L. [Wave flow of a thin layer of viscous fluid]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1948, vol. 18, pp. 3–28. (in Russ.)
2. Kapitza P.L., Kapitza S.P. [Wave flow of a thin layer of viscous fluid]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1949, vol. 19, pp. 105–120. (in Russ.)
3. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G. *Volnovoe techenie plenok zhidkosti* [Wave flow of liquid films]. Novosibirsk, Nauka, 1992. 256 p.
4. Vorontsov E.G., Tananayko Yu.M. *Teploobmen v zhidkostnykh plenkakh* [Heat and mass transfer in liquid films]. Kiev, Tehnika, 1972. 196 p.
5. Kholpanov L.P., Shkadov V.Ya. *Gidrodinamika i teplomassoobmen s poverkhnost'yu razdela* [Hydrodynamics and heat and mass transfer with interface]. Moscow, Nauka, 1990. 271 p.
6. Shkadov V.Ya. Wave flow regimes of a thin layer of viscous fluid subject to gravity. *Fluid Dynamics*, 1967, vol. 2, no. 1, pp. 29–34.
7. Demekhin E.A., Kaplan M.A., Shkadov V.Ya. Mathematical models of the theory of viscous liquid films. *Fluid Dynamics*, 1987, vol. 22, no. 6, pp. 885–893.
8. Scriven L.E., Sternling C.V. The Marangoni effects. *Nature*, 1960, vol. 187, pp. 186–188.
9. Prokudina L.A., Vyatkin G.P. Instability of a nonisothermal liquid film. *Doklady physics*, 1998, vol. 43, no. 10, pp. 652–654.
10. Prokudina L.A. Influence of Surface Tension Inhomogeneity on the Wave Flow of a Liquid Film. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 1, pp. 165–173.

Received 23 April 2020

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОЙ ПЛЕНКИ В ТЕПЛОМАСООБМЕННЫХ АППАРАТАХ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Л.А. Прокудина, М.П. Вихирев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Введение. Теплообменные аппараты, в которых реализуется течение тонких слоев вязких жидкостей, широко применяются в различных областях промышленности (химической, нефтехимической, энергетической, пищевой и др.). Эффективность использования пленочных аппаратов (пленочные ректификаторы, абсорберы, парогенераторы и др.) связана с большой поверхностью контакта при малых удельных расходах жидкости.

Цель работы. Численное исследование волновых характеристик течения тонкого слоя вязкой жидкости в условиях свободного стекания пленки и испарения жидкости.

Материалы и методы. В работе представлены результаты численного моделирования течения вертикальной жидкой пленки воды со свободной поверхностью при малых числах Рейнольдса в рамках дифференциального уравнения в частных производных для отклонения свободной поверхности пленки от невозмущенного состояния. Коэффициенты уравнения включают различные физико-химические факторы, в частности, параметр поверхностного натяжения, параметр влияния градиентов температуры. Представлена аналитическая зависимость для критических значений параметра Марангони. Течение жидкой пленки исследовано как при свободном стекании, так и при испарении. Учтено влияние в пленке жидкости градиентов температуры, приводящих к расширению области неустойчивости и изменяющих параметры волнового течения жидкой пленки (частоту, инкремент, фазовую скорость). Для расчета волновых параметров, областей неустойчивости жидких пленок используется утилита, разработанная на языке C++.

Результаты. Проведены вычислительные эксперименты для вертикальной пленки воды как в режиме свободного стекания, так и в процессе испарения. В результате вычислительных экспериментов выделены режимы течения жидкой пленки с максимальным значением инкремента, такие режимы зафиксированы в экспериментальных исследованиях других ученых. Рассчитаны критические значения параметра Марангони, при котором достигается эффект разрыва жидкой пленки.

Закключение. В условиях процесса испарения происходит увеличение значений инкремента и снижение фазовой скорости, что ускоряет эффект разрыва жидкой пленки в теплообменных аппаратах и образование на их поверхности «сухого пятна». Ввиду широкого распространения промышленных пленочных аппаратов, в которых используется испаряющаяся пленка (испарители, выпарные аппараты), исследование течений жидких пленок актуально, его результаты могут быть использованы при конструировании или модернизации существующего оборудования, а также при разработке технологических процессов в жидких пленках.

Ключевые слова: жидкая пленка, испарение, неустойчивость, параметр Марангони, малые числа Рейнольдса.

Литература

1. Капица, П.Л. Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости / П.Л. Капица // ЖЭТФ. – 1948. – Т. 18. – С. 3–28.
2. Капица, П.Л. Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости / П.Л. Капица, С.П. Капица // ЖЭТФ. – 1949. – Т. 19. – С. 105–120.
3. Алексеенко, С.В. Волновое течение пленок жидкости / С.В. Алексеенко, В.Е. Накоряков, Б.Г. Покусаев. – Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1992. – 256 с.
4. Воронцов, Е.Г. Теплообмен в жидкостных пленках / Е.Г. Воронцов, Ю.М. Тананайко. – Киев: Техника, 1972. – 196 с.
5. Холпанов, Л.П. Гидродинамика и теплообмен с поверхностью раздела / Л.П. Хол-

Автоматизированные системы управления...

панов, В.Я. Шкадов. – М.: Наука, 1990. – 271 с.

6. Shkadov, V.Ya. Wave flow regimes of a thin layer of viscous fluid subject to gravity / V.Ya. Shkadov // *Fluid Dynamics*. – 1967. – Vol. 2, No. 1. – P. 29–34.

7. Демехин, Е.А. О математических моделях теории тонких слоев вязкой жидкости / Е.А. Демехин, М.А. Каплан, В.Я. Шкадов // *Известия АН СССР. МЖГ*. – 1987. – № 6. – С. 73–81.

8. Scriven, L.E. The Marangoni effects / L.E. Scriven, C.V. Sternling // *Nature*. – 1960. – Vol. 187. – P. 186–188.

9. Прокудина, Л.А. Неустойчивость неизотермической жидкой пленки / Л.А. Прокудина, Г.П. Вяткин // *Доклады Академии наук*. – 1998. – Т. 362, № 6. – С. 770–772.

10. Прокудина, Л.А. Влияние неоднородности поверхностного натяжения на волновое течение жидкой пленки / Л.А. Прокудина // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87, № 1. – С. 158–166.

Прокудина Людмила Александровна, профессор кафедры вычислительной математики и высокопроизводительных вычислений, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; prokudinala@susu.ru.

Вихирев Михаил Павлович, аспирант кафедры вычислительной математики и высокопроизводительных вычислений, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; vikhirevmp@susu.ru.

Поступила в редакцию 23 апреля 2020 г.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Prokudina, L.A. Computational Modeling of Liquid Film Flow Regimes in Heat and Mass Transfer Devices at Low Reynolds Numbers / L.A. Prokudina, M.P. Vikhirev // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 104–110. DOI: 10.14529/ctcr200311

FOR CITATION

Prokudina L.A., Vikhirev M.P. Computational Modeling of Liquid Film Flow Regimes in Heat and Mass Transfer Devices at Low Reynolds Numbers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 104–110. DOI: 10.14529/ctcr200311

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА ПРИ ЕГО УДЕРЖАНИИ В ИМПУЛЬСНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

И.М. Ячиков¹, В.И. Ширяев²

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Введение. Существуют различные практические способы реализации магнитной левитации как метода удержания или подъема объекта с помощью одного только магнитного поля. В работе рассматривается следующий принцип создания равновесия тела. Небольшой цилиндрический неодимовый магнит удерживается при электромагнитном взаимодействии с пульсирующим током, протекающим через катушку. Для возникновения парящего эффекта при приближении магнита к катушке ток через нее отключается электронным ключом, срабатывающим от цифрового датчика Холла, расположенного на оси катушки. Вызывает практический интерес разработка простых рекомендаций, позволяющих прогнозировать факт удержания тела при данной конструкции катушки, токе через нее, размерах и свойствах постоянного магнита. Мало инженерных методик, позволяющих определять положение тела, его устойчивость и характер движения во взвешенном состоянии.

Целью исследования является теоретическое и экспериментальное исследование динамических параметров постоянного магнита при его удержании в импульсном магнитном поле и создание упрощенной расчетно-экспериментальной методики для определения характеристик поведения тела во взвешенном состоянии.

Материалы и методы. При выполнении работы применялись методы математического и компьютерного моделирования, а также экспериментального исследования. Созданное программное обеспечение с использованием средств разработки пакета *Mathcad* основывалось на известных методах численного интегрирования системы дифференциальных уравнений.

Результаты. Предложена упрощенная расчетно-экспериментальная методика по определению магнитных моментов для постоянного цилиндрического магнита и катушки с током, а также примерного значения координаты положения тела во взвешенном состоянии. Разработана математическая модель одномерного движения магнита под действием силы тяжести и электромагнитной силы взаимодействия с импульсным магнитным полем при известном состоянии, на котором происходит выключение тока.

Заключение. Экспериментально и посредством компьютерного моделирования установлено, что чем выше частота пульсаций, тем при удержании тела наблюдается его меньшая амплитуда пульсаций и устанавливается более устойчивое равновесие. Частота пульсаций уменьшается с увеличением массы постоянного магнита, причем есть критическая масса, которая уже не удерживается в электромагнитном поле. При увеличении напряжения, подаваемого на коммутатор катушки, возрастает частота пульсаций тела и потребляемая электрическая мощность, при этом коэффициент заполнения импульсов тока снижается.

Ключевые слова: постоянный магнит, импульсное магнитное поле, датчик Холла, остаточная магнитная индукция, электромагнитная сила, магнитная левитация, частота колебаний.

Введение

Английский физик Самуэль Ирншоу в середине XIX века доказал теорему, что пассивная левитация магнита над другим магнитом невозможна, одним из ее следствий является невозможность левитировать одному магниту над другим. Однако эта теорема верна только для случая статического равновесия и не рассматривает ситуацию, когда магнитное поле является динамическим. Магнитная левитация (*magnetic levitation*) возможна в следующих случаях: когда магнитное поле изменяется во времени, когда нестабильный постоянный магнит стабилизирует свое положение с помощью активной системы управления и когда сама система состоит из элементов с некоторыми движущими силами.

Существуют различные практические способы реализации магнитной левитации как метода удержания или подъема объекта с помощью одного только магнитного поля. Это могут быть способы, связанные с использованием вихревых токов, удерживающих тело в потенциальной яме [1], или постоянного магнита, находящегося в обратной связи с импульсным магнитным полем [2]. Основная проблема магнитной левитирующей системы связана с ее динамической устойчивостью, то есть способностью подавлять любое возможное колебательное движение. Большинство существующих схем левитации имеют недостаточное подавление колебаний тела, и его вибрации могут вывести объект за пределы зоны равновесия. Подавление перемещения тела из зоны равновесия может осуществляться несколькими способами, одним из которых является использование электромагнитов, управляемых посредством электроники.

На сегодняшний день самыми сильными постоянными магнитами (ПМ) являются неодимовые магниты (NdFeB), в которых используется сплав, содержащий редкоземельный материал неодим, а также железо и бор. Рассматриваемые ПМ имеют высокие показатели остаточной магнитной индукции и устойчивости к размагничиванию, что позволяет использовать их в изделиях и оборудовании, где требуется сильное магнитное поле.

Рассматриваемая в настоящей работе идея левитации достаточно проста и широко рассмотрена в Интернете прежде всего для демонстрации магнитной левитации тела. Небольшой цилиндрический неодимовый магнит удерживается при электромагнитном взаимодействии с током, протекающим через катушку. Для возникновения парящего эффекта при приближении магнита к катушке ток через нее отключается электронным ключом, срабатывающим от фотодатчика или цифрового датчика Холла, расположенного на оси катушки [3, 4]. Одна из простейших электрических схем такого устройства показана на рис. 1. Магнит под действием силы тяжести начинает падать, удаляясь от катушки, при некотором расстоянии от нее ток подается вновь, удерживая магнит в «подвешенном» состоянии. В реальности его поднятие и опускание осуществляется в очень небольшом диапазоне высот, но с довольно высокой частотой. Эта система впервые была реализована Холмсом [5], который заставил находиться в «подвешенном» состоянии магнитную стрелку. Есть ряд работ, посвященных разработке различных методов управления системами магнитной левитации [6, 7].

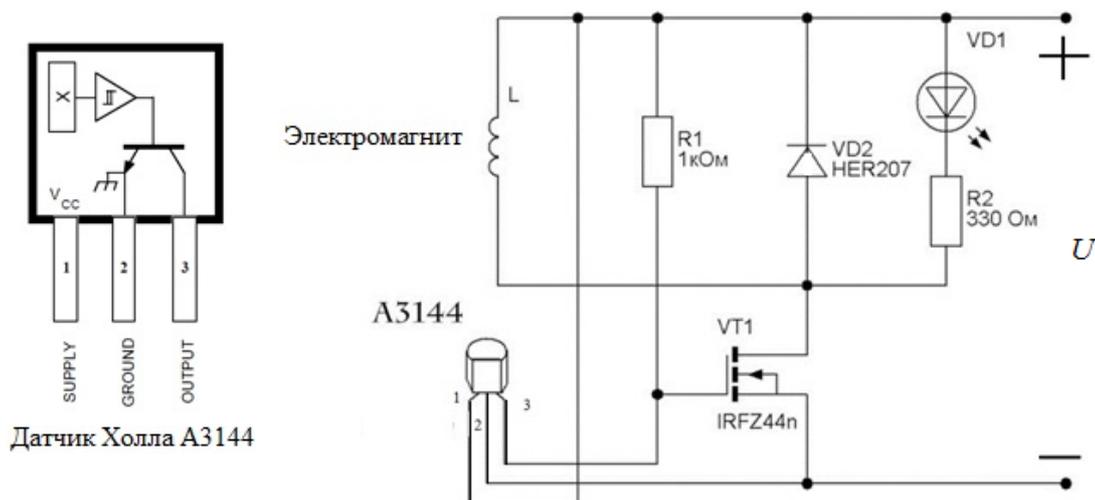


Рис. 1. Принципиальная схема электронного коммутатора тока через катушку управляемого сигналом датчика Холла, используемая для возникновения парящего эффекта при приближении постоянного магнита к катушке

Fig. 1. Schematic diagram of an electronic switch of current through a coil controlled by a signal Hall sensor used to create a hover effect when approaching a constant magnet to coil

В промышленной сфере самый большой объем исследований в области магнитной левитации связан с использованием транспортировки различных грузов. Его цель состоит в том, чтобы ис-

пользовать «парящий» транспорт и обеспечить максимально быструю и эффективную перевозку. Следующее использование левитации – это магнитные подшипники, предназначенные для удержания двух систем без непосредственного контакта. Вместо того чтобы изолировать компоненты от приложенных нагрузок, магнитная пара служит для передачи силы и вращающих моментов для соединения двух компонентов вместе без непосредственного контакта [8, 9].

Система магнитной левитации является нелинейной и открытой неустойчивой системой. Данные аспекты делают моделирование поведения и задачу управления такими системами довольно сложными. В настоящее время в литературе практически отсутствуют критерии, простые формулы и рекомендации по вопросу: будет ли наблюдаться взвешенное состояние при данной конструкции катушки, токе через нее, размерах и свойствах постоянного магнита. Нет инженерных методик, позволяющих прогнозировать положения тела, его устойчивость и характер движения во взвешенном состоянии.

Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование динамических параметров постоянного магнита при его удержании в импульсном магнитном поле и создание упрощенной расчетно-экспериментальной методики для определения характеристик поведения тела во взвешенном состоянии.

1. Расчет поля постоянного цилиндрического магнита и силы взаимодействия двух магнитов

Для постоянных магнитов, как правило, используются допущения, что намагниченность M однородна по всему объему и существует эквивалентность магнитного поля, создаваемого током катушки и постоянного магнита. Внутри самого магнита (без других внешних полей) индукция магнитного поля задается соотношением $B = \mu_0 \cdot M$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – универсальная магнитная постоянная. Намагниченность постоянного магнита можно рассматривать как результат поверхностной плотности тока, которая определяется как $J_m = \nabla \times M = \text{rot } M$.

Для того чтобы различать индуцированное магнитное поле и то поле, что вызвано спонтанно магнитным материалом, вводится индуцированное магнитное поле, обозначаемое как H , и определяется оно как $J_m = \nabla \times H = \text{rot } H$.

Плотность магнитного потока внутри постоянного магнита является векторной суммой H и M , в то время как снаружи ПМ намагничивание $M = 0$ и плотность магнитного потока B связана с напряженностью магнитного поля H константой. Это приводит к тому, что индукция магнитного поля B является непрерывной функцией, а M и H являются разрывными функциями.

Для точного расчета поля постоянного цилиндрического магнита вектор магнитной индукции определяется как $\vec{B} = [\nabla \times \vec{A}]$, где ∇ – оператор Набла, $\vec{A}(\vec{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{J_m(\vec{x}')}{|\vec{x} - \vec{x}'|} dV'$ – векторный потенциал, $J_m(\vec{x}')$ – плотность тока, dV' – элемент объема [10, 11]. В цилиндрической системе координат по этим уравнениям можно определить радиальную и осевую составляющие поля для ПМ с заданной намагниченностью M .

Для инженерного расчета воспользуемся алгоритмом, предложенным в работе [12]. В качестве упрощающих допущений принимаем, что мы рассматриваем магнитное поле на расстоянии существенно больше, чем размеры магнита. Если заменить магнит с однородной намагниченностью M круговым током I_m , текущим по боковой поверхности цилиндра радиуса R , то силу токов можно выразить через намагниченность магнита как $I_m = M \cdot 2\pi \cdot R$. Рассмотрим взаимодействие двух круговых токов, расположенных на одной оси Oz (рис. 2). Используя правило левой руки, можно показать, что осевая составляющая магнитного поля B_z приводит к появлению сил Ампера, стремящихся растянуть (или сжать) кольцо, – векторная сумма этих сил равна нулю. Наличие радиальной составляющей поля B_r приводит к возникновению сил Ампера, направленных вдоль оси магнитов, то есть к их притяжению или отталкиванию.

Так как рассматриваемая система обладает осевой симметрией, то модуль радиальной составляющей постоянен во всех точках кольцевого тока второго магнита. Следовательно, проекция силы, действующей на второй магнит, с учетом правила левой руки определяется как

$F = -I_2 B_r 2\pi r_2$. Положительное направление силы соответствует притяжению магнитов, положительное направление тока традиционно – против часовой стрелки.

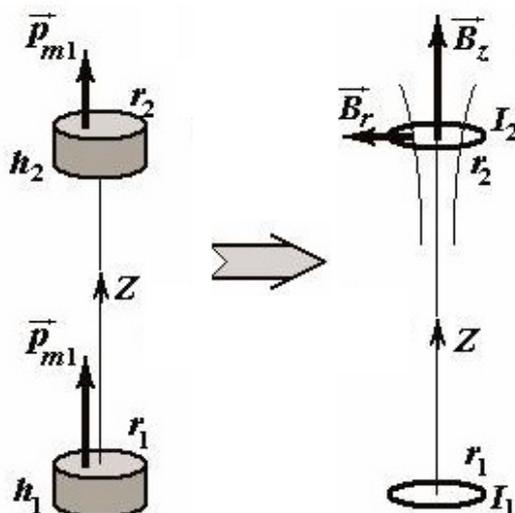


Рис. 2. Взаимодействие двух цилиндрических постоянных магнитов, расположенных на одной оси (а), и эквивалентная замена их круговыми токами (б)
 Fig. 2. Interaction of two cylindrical permanent magnets, located on the same axis (a), and their equivalent replacement by circular currents (б)

Магнитное поле, создаваемое первым магнитом, эквивалентно полю кругового тока. В рамках сделанных приближений ($z \gg r, h$) осевая составляющая поля определяется формулой

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot P_{m1}}{2\pi \cdot z^3}, \quad (1)$$

где $P_{m1} = I_1 S_1 = J_1 h_1 \pi r_1^2 = J_1 V_1$ – магнитный момент первого магнита (V_1 – его объем).

Радиальная составляющая поля

$$B_r = \frac{r_2}{2} \frac{\Delta B_z}{\Delta z} = \frac{3\mu_0 \cdot P_{m1}}{4\pi \cdot z^4} r_2. \quad (2)$$

Сила взаимодействия между магнитами определяется скоростью изменения осевой составляющей поля dB_z/dz . Подставляя выражение для радиальной составляющей поля, получим формулу для вычисления силы взаимодействия двух магнитов

$$F_m = -2\pi r_2 I_2 B_r = -I_2 \cdot 2\pi \cdot r_2 \frac{3\mu_0 \cdot P_{m1}}{4\pi \cdot z^4} r_2 = \frac{3\mu_0 \cdot P_{m1} \cdot P_{m2}}{2\pi \cdot z^4}. \quad (3)$$

В полученной зависимости (3) в качестве характеристик магнитов входят только их магнитные моменты, поэтому она может применяться для магнитов и катушек с током любой формы, важно только, чтобы расстояние между ними превышало их размеры и их магнитные моменты были параллельны.

2. Математическая модель поведения постоянного магнита в импульсном магнитном поле

Считаем, что на ПМ в «подвешенном» состоянии действуют две противоположно направленные силы: тяжести mg и электромагнитного взаимодействия F_m с полем катушки. Выберем цилиндрическую систему координат с началом, расположенным на пересечении оси катушки и нижнего ее торца (рис. 3).

Согласно закону Ньютона $m dW/dt = mg - F_m$, где m, W – масса и скорость тела соответственно.

Для обеспечения динамического равновесия тела применяется датчик Холла со схемой коммутации, позволяющей при координате z тела меньшей или равной Z_{off} отключать магнитную силу (ток через катушку $I = 0$), а при координате z более или равной Z_{on} – ее включать (ток через катушку $I \neq 0$).

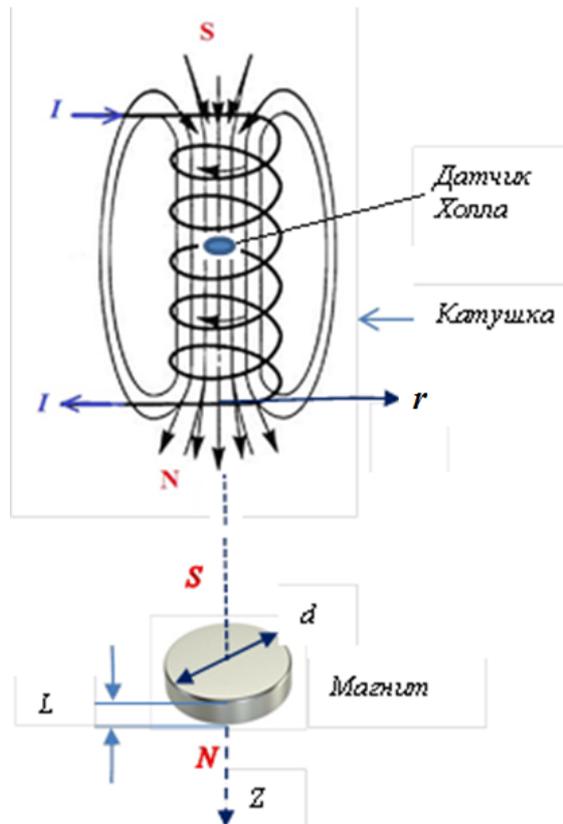


Рис. 3. Система координат при расчете движения магнита в импульсном магнитном поле катушки
 Fig. 3. Coordinate system for calculating the movement of the magnet

С учетом включения и выключения электромагнитной силы, определяемой по формуле (3), движение тела в вертикальном направлении приближенно можно записать системой дифференциальных уравнений (СДУ):

$$\frac{dW}{dt} = g - \alpha \cdot \frac{3\mu_0 P_{m1} P_{m2}}{2\pi \cdot m \cdot z^4} \tag{4}$$

$$\frac{dz}{dt} = W \tag{5}$$

где параметр коммутации тока, проходящего через катушку,

$$\alpha = \begin{cases} 0, & z \leq Z_{off} \\ 1, & z \geq Z_{on} \\ \alpha, & Z_{on} < z < Z_{off} \end{cases} .$$

Обозначив за $\beta = \frac{3\mu_0 P_{m1} P_{m2}}{2\pi \cdot m}$, можно СДУ (4)–(5) записать как

$$\frac{dW}{dt} = g - \alpha \cdot \frac{\beta}{z^4}, \tag{6}$$

$$\frac{dz}{dt} = W. \tag{7}$$

Для решения задачи Коши систему (6)–(7) дополним начальными условиями. Будем полагать, что тело в начальный момент времени помещается с нулевой скоростью в область между Z_{off} и Z_{on} , при этом магнитное поле катушки включено. Имеем:

$$z(0) = 0,5(Z_{on} + Z_{off}),$$

$$W(0) = 0, \quad (8)$$

$$\alpha = 1.$$

Для предложенной математической модели (6)–(8) в среде *Mathcad* создана программа «Движение постоянного магнита», позволяющая проводить компьютерное моделирование движения ПМ в импульсном магнитном поле. В качестве исходных данных необходимо экспериментально определить магнитные моменты ПМ и катушки P_{m1} , P_{m2} , массу магнита m и координаты Z_{off} и Z_{on} .

3. Экспериментальное определение параметров постоянного магнита и катушки

Для экспериментальных исследований и проведения моделирования был использован цилиндрический постоянный магнит NdFeB с аксиальной намагниченностью, имеющий диаметр $d = 14$ мм, высоту $L = 5$ мм, массу $m = 5,76$ г и объем $V = \pi d^2 \cdot L/4 \approx 770$ мм³. Созданная экспериментальная установка включала в себя неподвижную катушку высотой 19 мм с внутренним и внешним диаметром обмотки 35 мм и 59 мм соответственно. Используемая катушка без сердечника имела активное сопротивление $R_a = 155$ Ом и индуктивность $L = 160$ мГ. Для управления током через катушку использовался цифровой датчик Холла А3141. В качестве источника питания выбран CPS-3205 с возможностью точной регулировки напряжения от 0 до 32 В. Для измерения параметров импульсов тока, подаваемых на катушку в процессе левитации магнита, использовался осциллограф Tektronix DPO 3012.

Для определения параметров используемого постоянного магнита был взят второй такой же магнит, и, подкладывая между деревянным бруском и верхним магнитом листы бумаги, определялось максимальное расстояние r_{max} , на котором верхний магнит еще удерживает нижний в поле тяжести земли. Экспериментально для рассмотренного выше ПМ было получено значение $r_{\text{max}} \approx 44$ мм. Далее определяли величину магнитного момента ПМ, приравняв силу притяжения

двух магнитных диполей $F_m = \frac{3\mu_0 \cdot P_m^2}{2\pi \cdot r_{\text{max}}^4}$ силе тяжести $F_T = mg$. Были получены следующие число-

вые значения: магнитный момент $P_m = r_{\text{max}}^2 \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot g}{3 \cdot \mu_0}} \approx 0,46$ (А·м²); намагничивание $M = \frac{P_m}{V} \approx 7,58 \cdot 10^5$ (А/м) и остаточная магнитная индукция $B_r = \mu_0 M \approx 0,953$ (Тл).

При аналогичном характере взаимодействия катушки и рассмотренного выше магнита при постоянном токе через катушку $I_0 = 0,12$ А (напряжение $U_0 \approx 19$ В) экспериментально получили расстояние, на котором электромагнитная сила взаимодействия ПМ с полем катушки перестает удерживать силу тяжести. Для полученного значения $r_{\text{max}} \approx 22$ мм определен магнитный момент катушки

$P_{m2}(I_0) = \frac{2\pi \cdot r_{\text{max}}^4 \cdot mg}{3\mu_0 \cdot P_{m1}} \approx 0,036$ (А·м²). Для произвольного тока I через катушку имеем эмпи-

рическое уравнение $P_{m2}(I) = P_{m2}(I_0) \cdot I / I_0 \approx 0,3 \cdot I$ (А·м²). Можно определить также константу β , например, для тока через катушку I_0 получим $\beta \approx 2,27 \cdot 10^{-6}$ (м⁵/с²).

4. Результаты экспериментального и теоретического исследования динамических параметров поведения ПМ при его удержании в импульсном магнитном поле

Для полученных экспериментальных параметров катушки и ПМ на рис. 4, а показано расчетное значение его ускорения под действием электромагнитной силы в зависимости от расстояния до катушки. Видно, что на некотором расстоянии ускорение становится равным ускорению свободного падения g и, видимо, это критическое расстояние при действии статических сил $Z_{\text{кр}} \approx 22$ мм, на котором поле перестает удерживать тело. Полученное расчетное значение соответствует экспериментальному значению r_{max} .

Экспериментально было получено, что под действием поля только постоянного магнита используемый датчик Холла срабатывает на выключение и включение тока на расстоянии от него $z_1 \approx 20$ мм и $z_2 \approx 25$ мм соответственно.

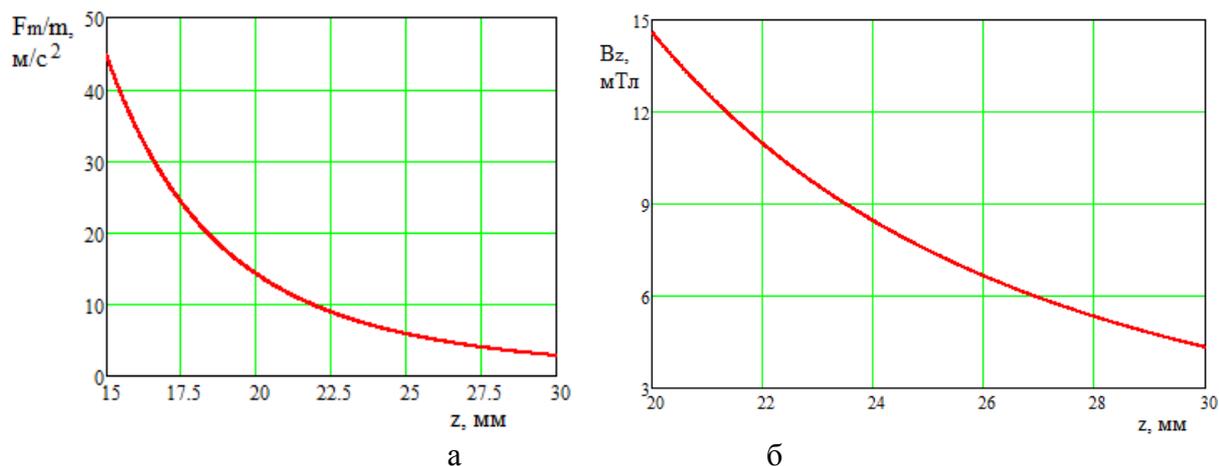


Рис. 4. Расчетное значение ускорения ПМ под действием электромагнитной силы F_m от расстояния до катушки (ток через катушку $I = 10$) (а) и расчетная осевая составляющая индукции магнитного поля на оси ПМ (б)

Fig. 4. The calculated value of the acceleration of a permanent magnet under the action of the electromagnetic force F_m from the distance to the coil (current through the coil $I = 10$) (а) and the calculated axial component of the magnetic field induction on the axis of the permanent magnet (б)

При прохождении через катушку тока I_0 и установке датчика на оси катушки на расстоянии $z_0 = -13$ мм он выключает ток при $z = X_{\text{off}} \approx 9$ мм. При дальнейшем перемещении магнита вдоль оси Oz наблюдался автоколебательный режим (включения и выключения тока) с изменяющейся частотой. Постоянный ток через катушку устанавливался на расстоянии большем $X_{\text{on}} \approx 13$ мм (колебания тока пропадали). С учетом установки датчика в точке z_0 полное выключение и включение тока происходило на расстоянии от магнита до катушки $X_{\text{off}} - z_0 \approx 22$ мм и $X_{\text{on}} - z_0 \approx 26$ мм.

Объяснить возникающие колебания тока можно следующим образом: датчик Холла работает в инверсном режиме: при его срабатывании ток через катушку выключается и наоборот. По паспортным данным А3141 он включается при магнитном поле в среднем около 10 мТл и выключается при поле в среднем около 4,5 мТл, гистерезис может составлять от 2 до 8 мТл (в среднем 5,5 мТл) [13]. На рис. 4, б показана осевая составляющая магнитного поля на оси постоянного магнита, рассчитанная по формуле (1). Видно, что на расстояниях, где возможно равновесие ПМ от 22 мм до 26 мм, магнитное поле падает на 4–5 мТл. Поле, включающее датчик, является суммой полей ПМ и катушки. Отключение тока в катушке в точке X_{off} приводит к тому, что магнитное поле вблизи датчика падает на поле катушки, что приводит к фактическому уменьшению расстояния X_{on} , где ток опять включается. Все это ведет к возникновению автоколебательного режима. В этом режиме и устанавливается динамическое равновесие тела.

На рис. 5 а, б для полученных экспериментальных параметров показан пример расчета движения тела при магнитной левитации с использованием программы «Движение постоянного магнита». Наблюдаемые колебания при удержании постоянного магнита близки к гармоническому сигналу, анализ с использованием дискретного преобразования Фурье показал малую мощность гармонических составляющих (рис. 5 в, г).

Экспериментально было установлено, что чем выше частота пульсаций, тем при удержании тела наблюдается более устойчивое равновесие. Это было подтверждено посредством компьютерного моделирования. Было получено, что чем меньше расстояние между координатами $\Delta X = X_{\text{on}} - X_{\text{off}}$, тем выше частота пульсаций и меньше их амплитуда, а значит, положение равновесия более устойчиво. Данный вывод можно получить из сравнения рис. 5 а и 5 б и из расчета частоты пульсаций в зависимости от ΔX , показанного на рис. 6.

Частота пульсаций ПМ как характеристика, влияющая на устойчивость динамического равновесия, зависит от множества других параметров, например, она определяется массой постоянного магнита при его удержании. При экспериментальном исследовании для того чтобы у магнита оставался постоянным магнитный момент, его массу изменяли за счет приклеивания к нему снизу кусочков неферромагнитного материала. На рис. 7 приведены расчетное и эксперимен-

Автоматизированные системы управления...

тальное изменения частоты пульсаций от суммарной массы ПМ. Видно, что с увеличением массы удерживаемого тела частота колебаний падает, а их амплитуда растет, кроме того, есть некая критическая масса, которая уже не удерживается в электромагнитном поле.

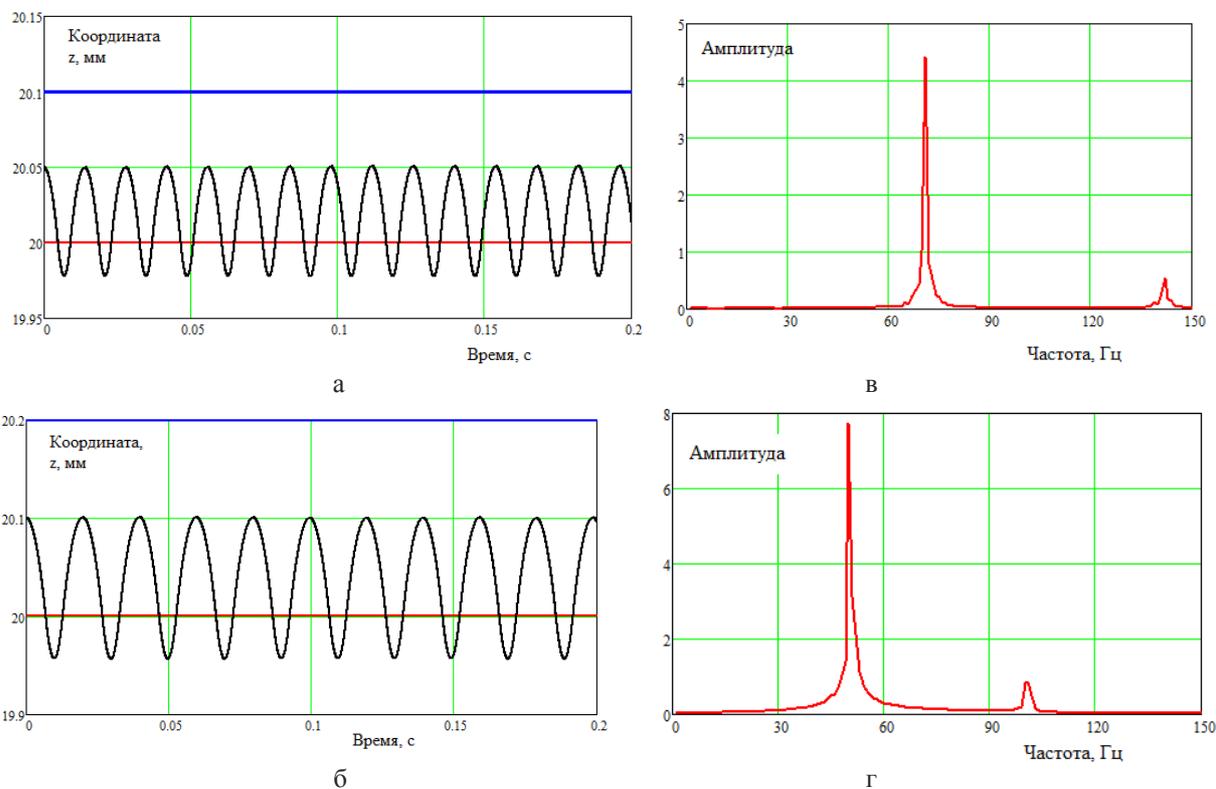


Рис. 5. Расчетные колебания ПМ от времени при его удержании в импульсном магнитном поле (а, б) и дискретное преобразование Фурье этих колебаний (в, г) при: а, в – $X_{\text{off}} = 20$ мм, $X_{\text{on}} = 20,1$ мм; б, г – $X_{\text{off}} = 20$ мм, $X_{\text{on}} = 20,2$ мм

Fig. 5. The Calculated oscillations of the PM from time to time when it is held in a pulsed magnetic field (a, б) and the discrete Fourier transform of these oscillations (c, d) at: a, c – $X_{\text{off}} = 20$ mm, $X_{\text{on}} = 20.1$ mm; b, d – $X_{\text{off}} = 20$ mm, $X_{\text{on}} = 20.2$ mm



Рис. 6. Расчетное изменение частоты пульсаций ПМ от координаты включения датчика при $X_{\text{off}} = 20$ мм, $m = 5,57$ г

Fig. 6. Calculated change in the pulsation frequency of a permanent magnet from the sensor switching on coordinate at $X_{\text{off}} = 20$ mm, $m = 5.57$ g

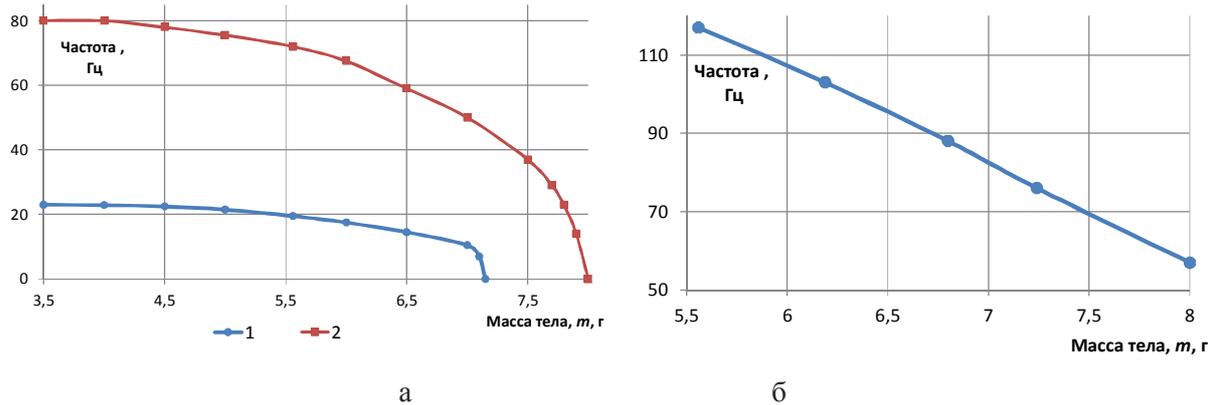


Рис. 7. Расчетное (а) (при: 1 – $X_{off} = 20$ мм и $X_{on} = 21,1$ мм; 2 – $X_{off} = 20$ мм и $X_{on} = 20,1$ мм) и экспериментальное (б) изменение частоты пульсаций от суммарной массы ПМ
Fig. 7. Calculated (a) (for: 1 – $X_{off} = 20$ mm and $X_{on} = 21.1$ mm; 2 – $X_{off} = 20$ mm and $X_{on} = 20.1$ mm) and experimental (б) change in the pulsation frequency from the total mass of the permanent magnet

Были также экспериментально исследованы параметры электрических пульсаций в зависимости от подаваемого на коммутатор напряжения при удержании ПМ массой m . Напряжение на катушке всегда имело форму меандра, при этом менялись частота, амплитуда и коэффициент заполнения импульсов. Под последним параметром понимается отношение длительности импульса к периоду.

На рис. 8 показано полученное изменение частоты пульсаций, среднего и амплитуды импульсного тока через катушку от подаваемого на электронный ключ напряжения U . Видно, что при увеличении напряжения в 1,78 раза существенно растет частота пульсаций примерно в 2,9 раза. Амплитуда импульсов тока растет нелинейно примерно в 1,3 раза, что связано с наличием в катушке индуктивного сопротивления. При этом средний ток падает примерно на 30 % и связано это со снижением коэффициента заполнения импульсов, показанным на рис. 9. Хотя ширина импульса уменьшается, потребляемая катушкой мощность увеличивается примерно на 25 %.

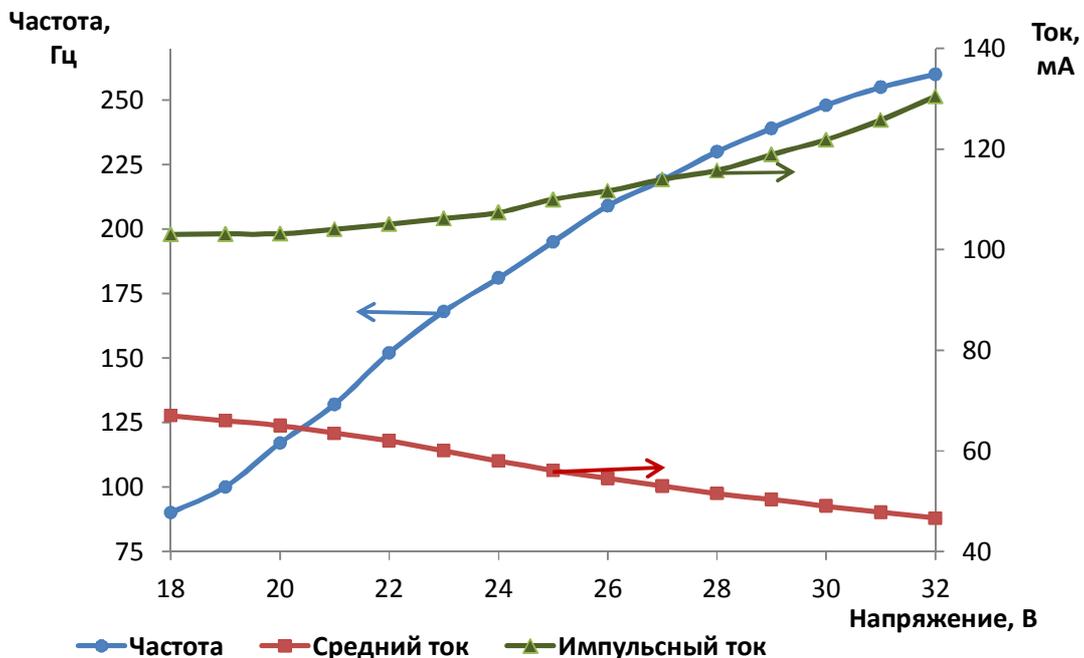


Рис. 8. Экспериментально полученное изменение частоты пульсаций, среднего и амплитуды импульсного тока через катушку от подаваемого напряжения
Fig. 8. Experimentally obtained change in the ripple frequency, average and amplitude of the pulse current through the coil from the applied voltage

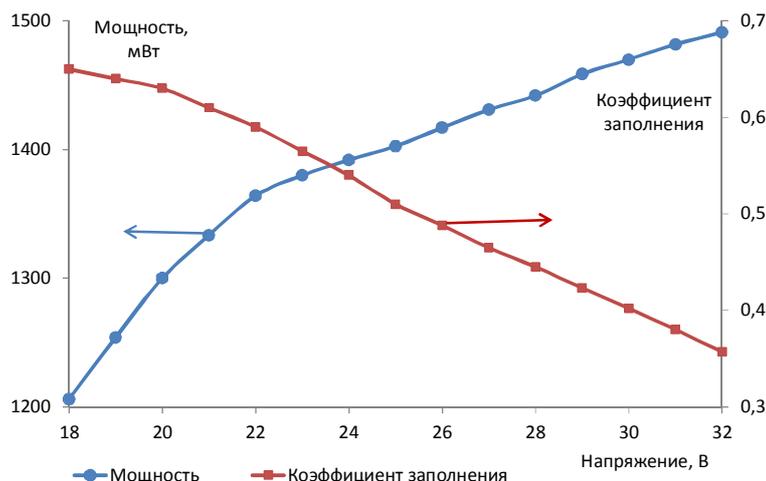


Рис. 9. Изменение потребляемой мощности и коэффициента заполнения импульсов тока, проходящих через катушку, от подаваемого напряжения
Fig. 9. Change in power consumption and duty cycle of current pulses passing through the coil from the applied voltage

Выводы

1. Предложена упрощенная расчетно-экспериментальная методика по определению магнитных моментов для постоянного цилиндрического магнита и катушки с током, а также значения координаты положения тела во взвешенном состоянии.
2. Создана математическая модель движения постоянного магнита при его удержании в импульсном магнитном поле, включающая в себя параметр коммутации тока, проходящего через катушку.
3. Экспериментально и посредством компьютерного моделирования было установлено, что чем выше частота пульсаций, тем при удержании тела наблюдается его меньшая амплитуда пульсаций и устанавливается более устойчивое равновесие.
4. Частота пульсаций при прочих равных условиях уменьшается с увеличением массы постоянного магнита, причем есть критическая масса, которая уже не удерживается в электромагнитном поле.
5. При увеличении напряжения, подаваемого на коммутатор катушки, увеличивается частота пульсаций тела и потребляемая электрическая мощность, при этом коэффициент заполнения импульсов тока снижается.
6. Результаты моделирования и созданное программное обеспечение можно использовать для упрощенной инженерной методики, позволяющей прогнозировать положение цилиндрического магнита, определять его относительную устойчивость при изменении параметров в импульсном магнитном поле и параметры движения во взвешенном состоянии.

Литература

1. Ячиков, И.М. Исследование поведения напряженности магнитного поля и положения тела во взвешенном состоянии в коническом индукторе с противовитком / И.М. Ячиков, Т.П. Ларина, О.Н. Вострокнутова // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2018. – № 1(38). – С. 55–62.
2. Уразаев, В. Техническая левитация: обзор методов / В. Уразаев // *Технологии в электронной промышленности*. – 2007. – № 6. – С. 10–17.
3. IT-лента. Магнитная левитация. – <http://itlenta.ru/chto-takoe-magnitnaya-levitatsiya> (дата обращения 12.10.2019).
4. Левитрон на датчике Холла. – http://samodelkilab.ucoz.ru/news/levitron_92_sobrat_svoimi_rukami/2014-01-19-321 (Дата обращения 20.09.2019).
5. Al-Muthairi, N.F. Sliding mode control of a magnetic levitation system / N.F. Al-Muthairi, and M. Zribi // *Mathematical Problems in Engineering* 2004. – 2004. – Vol. 2. – P. 93–107.
6. Edward, P.F. *Permanent Magnet and Electromechanical Devices. Material, Analysis, and Applications* / P.F. Edward. – San Diego: Academic Press, 2001. – 518 p.

7. Коген-Далин, В.В. Расчет и испытание систем с постоянными магнитами / В.В. Коген-Далин, Е.В. Комаров. – М.: Энергия, 1977. – 248 с.
8. Активные магнитные подшипники. – <http://amblab.narod.ru/Book/Chapter1.htm> (дата обращения 02.10.2018).
9. Магнитный подшипник. – <http://myfta.ru/articles/magnitnyepodshipniki> (дата обращения: 03.10.2019)
10. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика: учеб. пособие для вузов. В 10 т. Т. II. Теория поля / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – 8-е изд., стереот. – М.: Физматлит, 2001. – 536 с.
11. Арнольд, Р.Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами / Р.Р. Арнольд. – М.: Энергия, 1969. – 184 с.
12. Слободянюк, А.И. Физика 10 /13.6. Взаимодействие магнетиков с постоянным магнитным полем / А.И. Слободянюк. – <http://physbook.ru/index.php> (дата обращения 04.06.2020).
13. Платт, Ч. Электроника: логические микросхемы, усилители и датчики для начинающих / Ч. Платт // СПб.: ВХВ-Петербург, 2015. – 448 с.

Ячиков Игорь Михайлович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; jachikov@mail.ru.

Ширяев Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой систем автоматического управления, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; shiriaevvi@susu.ru.

Поступила в редакцию 4 июня 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr200312

DETERMINATION OF DYNAMIC PARAMETERS OF A PERMANENT MAGNET WHILE I HOLD IN A PULSE MAGNETIC FIELD

I.M. Yachikov¹, jachikov@mail.ru,

V.I. Shiryayev², shiriaevvi@susu.ru

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

²South Ural state University, Chelyabinsk, Russian Federation

Introduction. There are various practical ways to implement magnetic levitation as a method of holding or lifting an object using a magnetic field alone. The following principle of creating the balance of the body is considered in the work. A small cylindrical neodymium magnet is held during electromagnetic interaction with a pulsating current flowing through the coil. For a soaring effect to occur when the magnet approaches the coil, the current through it is switched off by an electronic key that is activated by a digital Hall sensor located on the axis of the coil. Of practical interest is the development of simple recommendations to predict the fact of body retention with a given coil design, current through it, dimensions and properties of a permanent magnet. There are few engineering techniques to determine the position of the body, its stability and the nature of movement in suspension.

The aim of the study is a theoretical and experimental study of the dynamic parameters of a permanent magnet when it is held in a pulsed magnetic field and the creation of a simplified computational-experimental technique for determining the characteristics of the body in suspension.

Materials and methods. When performing the work, methods of mathematical and computer modeling were used, as well as experimental studies. The created software using the development tools of the Mathcad package was based on well-known methods: numerical integration of a system of differential equations.

Results. A simplified computational and experimental technique is proposed for determining magnetic moments for a permanent cylindrical magnet and coil with current, as well as an approximate

value of the coordinate of the position of the body in suspension. A mathematical model of the one-dimensional motion of a magnet under the influence of gravity and electromagnetic forces of interaction with a pulsed magnetic field at a known distance at which the current is turned off is developed.

Conclusion. It was established experimentally and through computer simulation that the higher the frequency of the pulsations, the more rigid the pulsation amplitude is observed when the body is held and a more stable equilibrium is established. The ripple frequency decreases with increasing mass of the permanent magnet, and there is a critical mass that is no longer held in the electromagnetic field. As the voltage supplied to the coil switch increases, the frequency of the pulsations of the body and the consumed electric power increase, while the duty cycle of the current pulses decreases.

Keywords: permanent magnet, pulsed magnetic field, Hall sensor, residual magnetic induction, electromagnetic force, magnetic levitation, vibration frequency.

References

1. Jachikov I.M., Larina T.P., Vostroknutova O.N. *Issledovanie povedenija naprjazhennosti magnitnogo polja i polozhenija tela vo vzveshennom sostojanii v konicheskom induktore s protivovotkom* [Investigation of the behavior of magnetic field strength and suspended position of a body in a conical inductor with a countercurrent]. *Jeletrotehniczeskie sistemy i komplekсы*. 2018. № 1(38). P. 55–62.
2. Urazaev V. *Tehnicheskaja levitacija: obzor metodov* [Technical levitation: a review of methods] *Tehnologii v jelektronnoj promyshlennosti*, 2007. № 6. P. 10–17.
3. *IT-lenta. Magnitnaja levitacija* [Magnetic levitation]. – <http://itlenta.ru/chto-takoe-magnitnaya-levitatsiya> (Data obrashhenija 12.10.2019).
4. *Levitron na datchike Holla* [Levitron on the Hall sensor]. – http://samodelki-lab.ucoz.ru/news/levitron_92_sobrat_svoimi_rukami/2014-01-19-321 (Data obrashhenija 20.09.2019).
5. Al-Muthairi N.F., Zribi M. Sliding mode control of a magnetic levitation system. *Mathematical Problems in Engineering*. 2004, vol. 2, 2004, pp. 93–107.
6. Edward P.F. *Permanent Magnet and Electromechanical Devices. Material, Analysis, and Applications*. San Diego: *Academic Press*, 2001. – 518 p.
7. Kogen-Dalin V.V., Komarov E.V. *Raschet i ispytanie sistem s postojannymi magnitami* [Calculation and testing of permanent magnet systems]. M. Jenergija, 1977. – 248 p.
8. *Aktivnye magnitnye podshipniki* [Active magnetic bearings] [Jeletronnyj resurs]. – URL: <http://amblab.narod.ru/Book/Chapter1.htm> (Data obrashhenija 02.10.2018)
9. *Magnitnyj podshipnik* [Magnetic bearing] [Jeletronnyj resurs]. – URL: <http://myfta.ru/articles/magnitnyepodshipniki> (Data obrashhenija: 03.10.2019)
10. Landau L.D., Lifshic E.M. *Teoreticheskaja fizika* [Theoretical physics]: *ucheb. posob. dlja vuzov*. V 10 t. T. II. *Teorija polja*. – 8-e izd., stereot. – M.: FIZMATLIT, 2001. – 536 p.
11. Arnol'd R.R. *Raschet i proektirovanie magnitnyh sistem s postojannymi magnitami* [Calculation and design of permanent magnet magnets] M. Jenergija, 1969. – 184 p.
12. Slobodjanjuk A.I. *Fizika 10 /13.6. Vzaimodejstvie magnetikov s postojannym magnitnym polem*. [Physics 10 / 13.6. The interaction of magnets with a constant magnetic field] [Jeletronnyj resurs]. – URL <http://physbook.ru/index.php> (Data obrashhenija 04.06.2020).
13. Platt Ch. *Jeletronika: logicheskie mikroshemy, usiliteli i datchiki dlja nachinajushhih* [Electronics: logic, amplifiers and sensors for beginners]. SPb.: VHV-Peterburg, 2015. – 448 p.

Received 4 June 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ячиков, И.М. Определение динамических параметров постоянного магнита при его удержании в импульсном магнитном поле / И.М. Ячиков, В.И. Ширяев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 111–122. DOI: 10.14529/ctcr200312

FOR CITATION

Yachikov I.M. Shiryayev V.I. Determination of Dynamic Parameters of a Permanent Magnet while I Hold in a Pulse Magnetic Field. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 111–122. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200312

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Е.В. Гусев

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Цель исследования. Рассмотрены и проанализированы наиболее важные причины нестабильности управленческих решений при решении задач календарного планирования, логистического обеспечения и организации строительства.

Материалы и методы. Основой для проведения исследования выступает модель технологических объектных зависимостей.

Результаты. Описывается двухэтапный метод решения главной задачи управления строительством объекта. На первом этапе решается задача распределения объемов работ во времени, по планируемыми периодам (декада, месяц, квартал). С учетом этого распределения на втором этапе разрабатываются организационные решения для построения графика строительства объекта.

Заключение. Принятая модель для решения задач управления производственной деятельностью строительной организации позволила расширить область повышения надежности управленческих решений на стадии планирования строительно-монтажных работ, а на стадии организации производства – повысить вариативность этих решений.

Ключевые слова: модель технологических объектных зависимостей, МОТЗ, автоматизированные системы управления, особенности строительного производства.

Автоматизации управления строительства и строительного производства в 1970–80-е годы в СССР уделялось большое внимание. Было разработано и внедрено в эксплуатацию большое количество автоматизированных систем управления в строительстве (АСУС), подсистем, комплексов и отдельных задач с использованием экономико-математических методов и компьютерных технологий [1]. Задачи календарного планирования строительства объектов занимают центральное место в АСУС. Это связано с тем, что согласованная работа всех участников строительства не может строиться без календарного плана. Оптимизация расстановки механизмов, системы управления перевозками, оптимизация запасов материалов и других задач затрагивают лишь локальные производственные проблемы производственно-хозяйственной деятельности строительной организации [2–4].

За эти прошедшие годы был накоплен опыт, особенно в области экономико-математического моделирования и компьютеризации в строительстве, строительном производстве и календарном планировании. Были успехи и разочарования. Неудач было больше, что привело к определенному пессимизму.

Период перехода экономики на рыночные рельсы характерен отсутствием научных публикаций в области автоматизации в решении задач по управлению строительством, строительного производства и календарного планирования.

Развитие технологий информационного моделирования (ТИМ) в значительной мере активизировало работу по автоматизации решения задач управления. 3D-программные комплексы обладают большой информативностью и наглядностью [5–14]. Это позволяет решать задачи планирования (4D), учета и контроля (5D) и другие более эффективно. Надо отметить, что решение задач планирования, организации строительства и строительного производства базируется на прежней методологии и подходах. Причиной такой ситуации явилось отсутствие анализа неудач ранее разработанных систем управления. Этому положению дел способствовал большой времен-

Краткие сообщения

ной период (порядка 15–20 лет), когда научно-исследовательские работы в области планирования и организации строительства объектов не проводились.

Строительство и строительное производство имеет ряд существенных особенностей, отличающих его от промышленного производства. Они обусловили отличие подходов к разработке автоматизированных систем управления в промышленном строительстве. Если в промышленности базой для разработки АСУ является сама система управления, то в строительстве это сам объект управления, то есть процесс изготовления продукции строительной организацией. На практике такой базовой моделью является календарный план строительства объекта и его составляющая – график строительства объекта в виде циклограммы, линейной и сетевой моделей. Календарные планы строительства объекта входят в перечень обязательных документов проекта организации строительства (ПОС) и проекта производства работ (ППР). На их основе решаются многие задачи планирования, организации, учета, контроля и регулирования строительства объекта. Графики строительства обеспечивают решение управленческих задач необходимой информацией. Рассмотрим принципиальную схему последовательности решения логистической задачи (рис. 1).



Последовательность решения логистической задачи (принципиальная схема)
The sequence of solving a logistics problem (schematic diagram)

Важно отметить один момент. Из всех приведенных блоков только на четвертом разрабатываются документы, обладающие юридической силой.

Первый блок связан с разработкой календарного плана строительства объекта и его главной составляющей – объектного графика. Графики строительства относятся к классу организационно-технологических моделей (ОТМ), в которых отражаются организация строительного производства и технологическая последовательность взаимосвязанных работ.

Сама по себе последовательность решения задач логистического обеспечения строительства объекта не вызывает никаких сомнений. График позволяет определить распределение объемов каждой работы во времени (блок 2), что позволяет рассчитать календарную потребность (блок 3). На основании календарной потребности формируются и утверждаются план-графики с поставщиками ресурсов. Разработанные планы обеспечения направлены на реализацию разработанного календарного плана строительства объекта.

Но на ход строительного производства воздействуют различные факторы внешней и внутренней среды. Эти воздействия требуют корректировки графика строительства. Но эти корректировки требуют изменения в распределении объемов работ во времени, календарной потребности и графика поставок. План-графики практически не подлежат изменению благодаря своей юридической особенности. Возникает двойственность требований к источнику информации, то есть к графику строительства. С одной стороны, он должен не изменяться, чтобы информация для решения задач была бы стабильной и устойчивой. Но график – это модель, отражающая характерные черты объекта управления. Это технологическая последовательность взаимосвязанных работ и комплекс организационных решений. Организационные решения включают определение номенклатуры работ, выбор механизмов, состава бригад, расчет продолжительности выполнения каждой работы, совмещение производства работ и прочее. В этом случае одно из требований, которым должна обладать модель, – она должна легко корректироваться. На лицо объективное противоречие: быть устойчивым к воздействию факторов и легко корректироваться.

Одно из направлений в повышении стабильности информации, получаемой из графиков строительства, заключается в повышении надежности решений при разработке самого графика.

Разработаны и используются различные методы определения продолжительности, совмещения выполнения взаимосвязанных работ, учет влияния различных факторов (управление рисками) и другие. Однако добиться адекватности разработанного графика и действительного хода строительства объекта не удастся. Это один из аспектов несбалансированности управленческих решений и их реализации.

Рассмотрим еще один аспект. Цель социально-экономической системы, в том числе и строительной организации, описывается системой технико-экономических показателей (ТЭП). Согласно схеме взаимодействия общих функций управления, после формирования целевых задач в виде системы ТЭП вступает в действие функция «Планирование». Задачей на этом этапе разработки управленческих решений является определение «что надо сделать?», чтобы достичь запланированных показателей. Это стоимость и физические объемы работ в целом и в каждом планируемом периоде, доход и затраты, рентабельность и прибыль и т. д. Далее функция «Организация» направлена на разработку управленческих решений, связанных с реализацией запланированных объемов работ и логистического обеспечения строительного производства. Формируются документы, которые обеспечивают «как будем делать?» то, что запланировано.

Фактически последовательность реализации функций «Планирование» и «Организация» нарушена. Сначала разрабатывается организационно-технологическая модель в виде линейного, сетевого графика или циклограммы, а затем определяются объемные показатели, которые необходимо выполнить для достижения целевых установок. Получается, что первоначально решается «как будем делать?», а затем «что будем делать?».

Организационно-технологические модели по своей сути должны легко изменять свои параметры социальной адаптации к воздействию внешних и внутренних факторов. Учитывая эти особенности графиков строительства, можно сделать следующие выводы:

1. Применение графиков строительства в качестве модели объекта управления не позволяет сформировать устойчивый и стабильный документооборот, необходимый для логистического обеспечения строительства объекта и строительного производства.

2. Графики строительства необходимы для решения задач, связанных с общими функциями управления «Регулирование», «Учет», «Контроль».

3. Нарушение взаимосвязей в реализации общих функций управления «Планирование» и «Организация» не способствуют разработке документооборота, соответствующего действительному ходу реализации проекта.

Для разрешения определенных противоречий и повышения надежности управленческих решений необходимо в процесс формирования документооборота внести изменения. Они заключаются в следующем.

Прежде всего необходимо изменить базовую модель управления на более устойчивую. Такой моделью может служить модель объектных технологических зависимостей (МОТЗ). Эта модель описывает не только технологическую последовательность взаимосвязанных работ, но и количественные оценки этих взаимосвязей. Подробно о моделировании технологии строительства объекта можно ознакомиться в [15]. Она обладает значительной стабильностью, так как технология возведения объекта сохраняется и не изменяется в ходе строительного производства. МОТЗ позволяет решать задачи планирования и организации строительства, не нарушая последовательность взаимосвязи функции управления «Планирование» и «Организация». При этом календарное планирование строительства объекта разбивается на два этапа.

На первом этапе определяются виды и объемы работ, которые необходимо выполнить для реализации запланированных технико-экономических показателей по плановым периодам с учетом потенциала строительной организации, финансирования, логистического обеспечения, технологии строительства объекта и других факторов и условий.

На втором этапе разрабатываются организационные решения с учетом ранее запланированных по плановым периодам объемов работ, то есть рассчитывается график строительства объекта.

Двухэтапный подход к решению задачи календарного планирования СМР имеет ряд особенностей. На первом этапе, исходя из поставленной задачи – выполнение запланированных технико-экономических заданий, необходимо разработать такой план распределения объемов работ, который должен быть сбалансирован с плановыми заданиями и логистическим обеспечением. Деятельность строительной организации протекает в жестких рамках большого количества различ-

ных ограничений организационного, социального, технологического, технического, снабженческого характеров и других требований. Учет такого множества ограничений и требований ставит под сомнение предпосылку о наличии у руководства строительной организации некоторого множества решений в планировании СМР. Поэтому, в отличие от известных постановок, решение данной задачи направлено не на выбор наилучшего варианта по установленному критерию, а на поиск пути достижения цели при данных условиях. Сущностью задачи является поиск такого набора работ на объектах производственной программы в натуральном и стоимостном выражении, который обеспечивает выполнение экономических плановых заданий. Решение сводится к нахождению сложной совокупности объемов работ, которые строительная организация должна выполнить в каждом плановом периоде планируемого года для обеспечения собственной жизнеспособности.

На втором этапе рассчитывается график строительства объекта. Некоторые особенности разработки графика связаны с применением базовой модели объектных – технологических зависимостей и решением задачи на первом этапе. Поскольку распределение объемов работ ведется по каждому плановому периоду планируемого года, то и организационные решения разрабатываются согласно этому распределению. Основой для определения количества возобновляемых и невозобновляемых ресурсов является запланированный ранее на первом этапе объем работы в рассматриваемом плановом периоде. Потребление и использование этих ресурсов может быть неравномерным на всем протяжении выполнения работы.

График строительства, разработанный на основе МОТЗ в виде линейного графика Ганта, обладает большой информативностью по отношению к обычному. Это связано с появлением частных и полных резервов времени по началу и окончанию каждой работы, возможностью проектировать начало и окончание работ «внутри» временной области раздельно друг от друга.

Двухэтапное сбалансированное календарное планирование СМР позволяет повысить надежность управленческих решений на этапе планирования (распределения) объемов работ по планируемому периоду, а на этапе организации производства работ – увеличить адаптационные качества модели управления.

Надежность управленческих решений на этапе определения объемных параметров календарного плана повышается за счет отсутствия зависимости – планирования объемов работ на основе принятых организационных решений. В данном случае основой решения задачи является модель технологии строительства объекта, отображающая технологические взаимосвязи между работами по их началу и окончанию, количественные оценки этих связей и временные области выполнения работ.

Организационные решения по своей сути не должны быть такими стабильными, как решения на стадии планирования. Это объясняется тем, что в процессе разработки графика строительства объекта учесть все факторы, которые могут повлиять на производственный процесс, невозможно. Поэтому график как модель строительного производства должен легко корректироваться. Модель объектных технологических зависимостей (МОТЗ), принятая для решения поставленных задач, позволяет расширить возможности графика строительства к воздействию неучтенных факторов внутренней и внешней среды за счет новых свойств коммуникационного характера.

Литература / References

1. Гусев Е.В. Технологическое моделирование и сбалансированное планирование строительно-монтажных работ. Челябинск: Редактор, 1990. 147 с. [Gusev E.V. *Tekhnologicheskoye modelirovaniye i sbalansirovannoye planirovaniye stroitel'no-montazhnykh rabot* [Technological Dependence and Balanced Planning of Construction Works]. Chelyabinsk, Redaktor, 1990. 147 p.]
2. Baldwin A., Bordoli D. *Handbook for Construction Planning and Scheduling*. UK, John Wiley & Sons, 2014. 408 p.
3. Halpin D.W. *Construction Management*. New York, John Wiley & Sons, 2011. 448 p.
4. Mincks W., Johnston H. *Construction Jobsite Management*. Cengage Learning, 2010. 480 p.
5. Talapov V.V. About The General Scheme of the Information Model of Construction Object. *News of higher educational institutions. Construction*, 2017, vol. 697, no. 1, pp. 91–97.
6. Талапов В.В. Три принципа, лежащие в основе BIM. САПР и графика. 2016. № 8 (238). С. 12–15. [Talapov V.V. [Three Principles Underlying BIM]. *CAD and graphics*, 2016, vol. 238, no. 8, pp. 12–15. (in Russ.)]

7. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. *BIM Handbook. Second edition*. N.Y., Wiley, 2011, 626 p.
8. Bergin M.S. History of BIM. *Architecture Research Lab*, 2017, pp. 1–6.
9. Rowlinson S. Building Information Modelling, Integrated Project Delivery and all that. *Construction Innovation. Emerald Group Publishing Ltd*, 2017. DOI: 10.1108/CI-05-2016-0025.
10. Volk R., Stengel J., Schultmann F. Building Information Modeling (BIM) for Existing Buildings – Literature Review and Future Needs. *Automation in Construction*, 2014. DOI: 10.1016/j.aut-con.2013.10.023.
11. Isikdag U, Aouad G., Underwood J., Wu S. Building Information Models: a Review on Storage and Exchange Mechanisms. *Proceedings of the CIB W78's 24th International Conference on IT in Construction*, 2007, pp. 135–143.
12. Trani M.L., Cassano M., Minotti M., Todaro D. Construction Site BIM Requirements. *Proceedings 30th Annual Association of Researchers in Construction Management Conference, ARCOM 2014*, 2014, pp. 663–672.
13. Caldas C.H., Soibelman L. Automating Hierarchical Document Classification for Construction Management Information Systems. *Automation in Construction*, 2003, vol. 2, no. 4, pp. 395–406.
14. Galloway P.D. Survey of the Construction Industry Relative to the Use of CPM Scheduling for Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2006, 132(7), pp. 697–711.
15. Gusev, E. Construction and Assembly Works Planning: Optimization or Search for Solutions. *3rd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2017). – SHS Web Conf. Section: Sustainable Development of Industrial Enterprises*, 2017, vol. 35, no. 01147, 6. p. DOI: 10.1051/shsconf/20173501147.

Гусев Евгений Васильевич, д-р техн. наук, профессор кафедры прикладной экономики, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, gusevev@susu.ru.

Поступила в редакцию 18 мая 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr200313

SIGNIFICANT FEATURES OF IMPROVING RELIABILITY OF DECISION-MAKING IN CONSTRUCTION MANAGEMENT

E.V. Gusev, gusevev@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Aim. The author is considered and analyzed the most important reasons for the instability of managerial decisions in solving problems in construction, for example, scheduling in construction, logistics and construction administration.

Materials and methods. The basis of the research is Project Technological Dependencies Model.

Results. A two-stage method for solving the main task of managing the construction of an object is described. At the first stage the task of distributing the volume of work over time for the planned periods (decade, month, quarter) is solved. At the second stage organizational solutions are developed to build a construction schedule for the facility with distribution from the first step in mind.

Conclusion. The author suggests using a project technological dependencies model to solve the problems of managing the production activities of a construction organization. This model allows

Краткие сообщения

you to expand the field of improving the reliability of management decisions at the planning stage of construction and installation works. Also, this model allows to increase the variability of solutions at the stage of production organization.

Keywords: project technological dependencies model, PTDM, automated control systems, construction features.

Received 18 May 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Гусев, Е.В. Некоторые аспекты повышения надежности управленческих решений в строительстве / Е.В. Гусев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 123–128. DOI: 10.14529/ctcr200313

FOR CITATION

Gusev E.V. Significant Features of Improving Reliability of Decision-Making in Construction Management. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 123–128. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200313

OPTIMIZATION OF THE LINING WEAR COEFFICIENT ON THE BASIS OF CONTROL OF THREE-PHASE CURRENT ELECTRIC ARCS CHARACTERISTICS

O.V. Loginovskiy¹, loginovskiyo@mail.ru,
E.M. Kostyleva¹, ezaretskaya@yandex.ru,
I.M. Yachikov², jachickov@mail.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Introduction. Currently, the most important task of the steel industry is to constantly update the product range, increase its operational characteristics, and increase the efficiency of equipment use. Achieving goals is possible with a methodological base based on the principles of system analysis.

In metallurgy, multi-electrode arc furnaces using three-phase alternating current are widely used. The lining layer present in such units during operation is subjected to thermal and electromagnetic effects created by the arc. A quantitative measure of this effect is the lining wear coefficient (LWC). In most studies, the influence of the described factors on the LWC is not taken into account. At the same time, heat fluxes affecting all elements of the furnace structure, including the lining, depend on the shape of the arc.

Aim. Selecting the parameters of the electric arc furnace, which optimizes the lining wear coefficient

Materials and methods. When performing the work, methods of computational mathematics and evolutionary methods of numerical optimization of functions of many variables were used. Software which uses freely distributed scientific libraries was based on them.

Results. The influence of the system of three burning arcs on the wear coefficient of the lining is considered taking into account the shape of the axis of the arc column.

Conclusion. An algorithm and program have been elaborated that allow us to evaluate the thermal perception of the lining depending on the shape of the arcs. Based on the developed algorithm, special software can be created that is integrated into the system of automated regulation and prediction of the thermal operation of multi-electrode arc units to increase the reliability of assessing the wear of the furnace lining under different technological modes of arc burning.

Keywords: electric arc, multi-electrode arc furnace, three-phase alternating current, electromagnetic interaction, arc post axis shape, lining wear coefficient, evolutionary algorithms.

Introduction

The problems of increasing the efficiency of industrial enterprises are now becoming increasingly relevant [1, 2], while the task of optimizing the activity of industrial units and machines is of particular importance. There are a large number of industrial units, the basis of which is the use of energy created by an electric arc. The lining layer present in such units during operation is subjected to thermal and electromagnetic effects created by the arc. A quantitative measure of this effect is the lining wear coefficient (LWC), one of the most important technological characteristics of modern multi-electrode arc furnaces. The most significant effect on the LWC is exerted by the arc power, the distance from the arc axis to the lining, and the applied voltage. In most studies, the influence of the described factors on the LWC is not taken into account. At the same time, heat fluxes affecting all elements of the furnace structure, including the lining, depend on the shape of the arc.

The aim of the work is to study this effect and find the parameters that provide optimization of the LWC. To achieve this goal, an algorithm for calculating the shape of arcs in an AC steelmaking furnace has been developed, which will be used to optimize the objective function.

Analysis of the shape of alternating current electric arcs parallel burning in the direction of the horizontal surface during their electromagnetic interaction and the influence of this shape on the lining wear coefficient

The electromagnetic interaction of the arcs is determined by the equilibrium equation of the arc column element [3–6]

$$d\vec{F}_{1-2} + d\vec{F}_{1-1} + d\vec{F}_{1-y} = 0, \quad (1)$$

where $d\vec{F}_{1-2}$ is the force of interaction of an arc element with another arc (or other arcs), $d\vec{F}_{1-1}$ is the force of interaction of an arc element with itself, $d\vec{F}_{1-y}$ is centrifugal force seeking to straighten an arc column.

Electromagnetic interaction of three arcs through which harmonic currents with phase shift flow $2\pi/3$: $i_1 = i_{01} \sin \frac{2\pi}{T} \tau$, $i_2 = i_{02} \sin \left(\frac{2\pi}{T} \tau + \frac{2\pi}{3} \right)$ и $i_3 = i_{03} \sin \left(\frac{2\pi}{T} \tau - \frac{2\pi}{3} \right)$, where i_{01} , i_{02} , i_{03} are amplitude values of currents [4]. Consider the case when the current value of the currents is the same $i_{01} = i_{02} = i_{03} = i_0$.

In the electromagnetic interaction of three alternating currents, two repulsive forces act on the element $d\vec{l}_1$: $dF_{1-2} = \chi \cdot i_1 i_2 dl_1$, $dF_{1-3} = \chi \cdot i_1 i_3 dl_1$. Direction of the resulting force $d\vec{F}_{1-2-3}$ changes over time and coincides at any time with the vector $d\vec{F}_{1-2} + d\vec{F}_{1-3}$. The modulus of the resulting force is equal to

$$dF_{1-2-3} = \sqrt{3} dF_{1-2} = \sqrt{3} F_0 \left| \sin \frac{2\pi}{T} \tau \right| \cdot dl_1, \quad (2)$$

where $F_0 = \frac{\chi \cdot i_0^2}{2}$.

Since the instantaneous strength values dF_{1-2-3} are continuously changing during each half-cycle, the electrodynamic forces acting on the arc element change in magnitude and direction. We find the average integral force over half a period that determines the average position of the arc

$$d\vec{F}_{1-2-3} = -\frac{2i_0^2}{T} \cdot \frac{\chi\sqrt{3}}{2} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin\left(\frac{2\pi}{T}\tau\right) d\tau \cdot dl_1 = -\frac{\sqrt{3}}{\pi} i_0^2 \cdot dl_1 \approx -0,551 \cdot i_0^2 \cdot dl_1. \quad (3)$$

This force is directed from the center of decay of the electrodes.

Consider the electromagnetic interaction of an arc element $d\vec{l}_1$ and direct current from the side of the arc. Vector $d\vec{F}_{1-1}$ is in the plane yOz , is perpendicular to $d\vec{l}_1$ and oppositely directed to the vector $d\vec{F}_{1-2}$, and its module [4]

$$\left| d\vec{F}_{1-1} \right| = \frac{\mu_0 I_1^2}{4\pi} \int_0^l \frac{\left(\frac{dy(\zeta)}{d\zeta} (\zeta - z) - (y(\zeta) - y(z)) \right)}{r_{31}^3} d\zeta \cdot dl_1 = \chi_1 I_1^2 \cdot dl_1. \quad (4)$$

In the electromagnetic interaction of a harmonic current $i_1 = i_{01} \sin \left(\frac{2\pi}{T} \tau + \phi \right)$ with itself average integral value of force

$$dF_{1-1} = \frac{\chi_1}{T} \int_0^T i_1^2 d\tau = \frac{\chi_1 i_{01}^2}{T} \int_0^T \left(\sin \frac{2\pi}{T} \tau + \phi \right)^2 d\tau \cdot dl_1 = \frac{\chi_1 i_{01}^2}{2} \cdot dl_1 = \chi_1 i_{01}^2 \cdot dl_1.$$

It is seen that the electromagnetic interaction of direct current with itself is the same as an alternating current with the same effective value.

In the general case, equation (1) of the equilibrium of an element of an arc column during its electromagnetic interaction with one or two arcs of constant or alternating currents can be written as

$$k_1 d\vec{F}_{1-2} + d\vec{F}_{1-1} + d\vec{F}_{1-y} = 0. \quad (5)$$

Based on the algorithms proposed in [3, 4, 6–12], one can solve equation (5) and obtain an approximate description of the shape of the arc.

The most important indicator of the thermal load of the furnace lining is the lining wear coefficient (LWC) [13–15]. LWC is defined as $LWC = \frac{3P_d U_d}{a^2}$, where P_d is the arc power, U_d is the arc voltage, a is a distance from the arc axis to the lining [13–15].

To more accurately determine the heat perception of the side wall, we modify the LWC calculation formula taking into account the shape of the axis of the arc column found when solving equation (5). To do this, we will find the LWC at the minimum distance from the wall from the arc. From physical considerations, we can conclude that the minimum distance from the arc to the lining is achieved at the point of contact of the arc with the surface of the melt. Based on this, it is possible to formulate a control problem for finding the optimal coefficient of wear of the lining, changing within acceptable limits the parameters that determine the operation of the furnace. As such parameters, the applied voltage and the distance from the surface of the melt to the end of the electrode can act, which can be adjusted during each stage of the process. To solve the problem of optimizing the LWC value, we use an approximately determined dependence of the shape of the arc on the control parameters. Since this dependence cannot be described analytically, the use of gradient optimization methods seems inappropriate. Therefore, for optimization, evolutionary methods are used.

For optimization, a genetic algorithm was chosen [16] with a population size of 17 individuals, a simple single-point crossover, a mutation with a probability of 0.2 was implemented. The software implementation is done using freely distributed Python packages. It was found that at currents of about 50 kA and arc powers of about 20 MW, the lining wear coefficient varies from 1630 to 1750 MW • V/m².

Conclusions

Based on the shape of the arcs, algorithmic and software have been developed to optimize the wear coefficient of the lining from three arcs of three-phase alternating current burning in the direction of a horizontal surface, make decisions on the effective heat transfer of the radiation of the arcs to the charge, depending on the shape of the arcs, determined by the power and voltage of the arc, the distance from the arc to the axis of the electrode.

References

1. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N., Burkova I.V. Gelrud Ya.D., Korennaya K.A., Shestakov A.L. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy: monografiya* [Management of Industrial Enterprises: Strategies, Mechanisms, Systems: Monograph]. Moscow, INFRA-M, 2018. 410 p.
2. Loginovskiy O.V., Gollai A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *Effektivnoe upravlenie organizacionnymi i proizvodstvennymi strukturami* [Effective Management of Organizational and Production Structures: Monograph]. Moscow, INFRA-M, 2020. 450 p.
3. Yachikov I.M., Kostyleva E.M. [The Mathematical Modeling of Form of Arcs with their Electromagnetic Coupling. Report 1]. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, 2014, vol. 57(1), pp. 59–64. (in Russ.)
4. Yachikov I.M., Kostyleva E.M. [The Mathematical Modeling of Form of Arcs with their Electromagnetic Coupling. Report 2]. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, 2014, vol. 57(5), pp. 56–61. (in Russ.)
5. Bortnichuk N.I., Krutianskii M.M. *Plazmenno-dugovye plavilnye pechi* [Plasma-Arc Melting Furnaces]. Moscow, Energoatomizdat, 1981. 120 p
6. Yachikov I.M., Kostyleva E.M. *Modelirovanie formy dug postoyannogo toka pri ih elektromagnitnom vzaimodeistvii* [Modeling the Shape of DC Arcs During their Electromagnetic Interaction]. *Interregional Collection of Scientific Papers*. Magnitogorsk, Publishing House of Magnitogorsk State Technical University, 2011, pp. 195–201. (in Russ.)
7. Azbelev N.V., Maksimov V.P., Rakhmatullina L.F. *Elementy sovremennoi teorii funktsionalno-differentsialnykh uravnenii. Metody i prilozheniya* [Elements of the Modern Theory of Functional-Differential Equations. Methods and Applications]. Moscow, Institute for Computer Research, 2002. 304 p.
8. Dmitriev S.S., Kuznecov E.B. [Numerical Solution of Systems of Integrodifferential-Algebraic Equations with Delayed Argument]. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2008, vol. 3, pp. 430–444. (in Russ.)
9. Verzhbickii V.M. *Chislennyye metody. Matematicheskii analiz i obyknovennyye differentsialnyye uravneniya* [Numerical Methods. Mathematical Analysis and Ordinary Differential Equations]. Moscow, Higher School, 2001. 383 p.
10. Yachikov I.M., Kostyleva E.M. [The Position of Electric Arcs during their Electromagnetic Interaction in Multi-Electrode Arc Furnaces]. *Information Technologies and Systems: materials of the First Int. Conf.* Chelyabinsk, Publishing House of Chelyabinsk State University, 2012. pp. 36–38. (in Russ.)

11. Yachikov I.M., Kostyleva E.M. [An Approximate Algorithm for Finding the Position of Electric Arcs during their Electromagnetic Interaction in Multi-Electrode Arc Furnaces]. *Theory and practice of thermal processes in metallurgy: a collection of reports of an international scientific and practical conference*. Ekaterinburg, Publishing House of Ural Federal University, 2012, pp. 423–426. (in Russ.)
12. Yachikov I.M., Kostyleva E.M. *Vzaimodeistvie dug* [Arcs Interaction] // Certificate of state registration of the program, 2013, no. 2013619388.
13. Sisoyan G.A. *Elektricheskaya duga v elektricheskoi pechi* [Electric Arc in an Electric Furnace]. Moscow, Metallurgy, 1971. 304p.
14. Egorov A.V. *Raschet moshchnosti i parametrov elektroplyavilnyh pechei* [Calculation of Power and Parameters of Electric Melting Furnaces: Textbook for Universities]. Moscow, MISIS, 2000. 272 p.
15. Nikolayev A.A. *Povyshenie effektivnosti raboty elektromehnicheskogo kompleksa "Dugovaya staleplavilnaya pech – staticheskiy tiristornyi kompensator"* [Improving the Efficiency of the Electrical Complex "Arc Steelmaking Furnace - Static Thyristor Compensator". Scientific monograph. Magnitogorsk, Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2017. 318 p
16. Emelianov V.V., Kureichik V.V., Kureichik V.M. *Teoriya i praktika evolucionnogo modelirovaniya* [Theory and Practice of Evolutionary Modeling]. Moscow, FIZMATLIT, 2003. 432 p.

Received 2 June 2020

УДК 621.365.2:681:325

DOI: 10.14529/ctcr200314

ОПТИМИЗАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗНОСА ФУТЕРОВКИ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

О.В. Логиновский¹, Е.М. Костылева¹, И.М. Ячиков²

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

Введение. В настоящее время важнейшей задачей черной металлургии является постоянное обновление сортамента продукции, повышение ее эксплуатационных характеристик, повышение эффективности использования оборудования. Достижение поставленных целей возможно при наличии методологической базы, основанной на принципах системного анализа.

В металлургии широкое распространение получили многоэлектродные дуговые печи с использованием трехфазного переменного тока. Имеющийся в таких агрегатах слой футеровки в процессе функционирования подвергается тепловому и электромагнитному воздействию, создаваемому дугой. Количественной мерой данного влияния является коэффициент износа футеровки (КИФ). В большинстве исследований влияния описанных факторов на КИФ форма дуги не учитывается. В то же время от формы дуги зависят тепловые потоки, воздействующие на все элементы конструкции печи, и в том числе на футеровку.

Цель исследования. Выбор параметров работы электродуговой печи, обеспечивающий оптимизацию коэффициента износа футеровки.

Материалы и методы. При выполнении работы применялись методы вычислительной математики и эволюционные методы численной оптимизации функций многих переменных. На них основывалось созданное с использованием свободно распространяемых библиотек программное обеспечение. **Результаты.** Рассмотрено влияние системы трех горящих дуг на коэффициент износа футеровки с учетом формы оси столба дуги.

Заключение. Создан алгоритм и программа, позволяющие оценивать тепловосприятие футеровки в зависимости от формы дуг. На основе разработанного алгоритма может быть создано

специальное программное обеспечение, встроенное в систему автоматизированного регулирования и прогнозирования тепловой работы многоэлектродных дуговых агрегатов, для повышения достоверности оценки износа футеровки печи при разных технологических режимах горения дуг.

Ключевые слова: электрическая дуга, многоэлектродная дуговая печь, трехфазный переменный ток, электромагнитное взаимодействие, форма оси столба дуги, коэффициент износа футеровки, эволюционные алгоритмы.

Литература

1. Логиновский, О.В. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: монография / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 410 с.

2. Логиновский, О.В. Эффективное управление организационными и производственными структурами: монография / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др.; под ред. О.В. Логиновского. – М.: ИНФРА-М, 2020. – 450 с.

3. Ячиков, И.М. Математическое моделирование формы дуг при их электромагнитном взаимодействии. Сообщение 1 / Ячиков И.М., Костылева Е.М. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – 57(1). – С. 59–64.

4. Ячиков, И.М. Математическое моделирование формы дуг при их электромагнитном взаимодействии. Сообщение 2 / Ячиков И.М., Костылева Е.М. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – 57(5). – С. 56–61

5. Бортничук, Н.И. Плазменно-дуговые плавильные печи. / Н.И. Бортничук, М.М. Крутянский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 120 с.

6. Ячиков, И.М. Моделирование формы дуг постоянного тока при их электромагнитном взаимодействии: межрегион. сб. науч. тр. / И.М. Ячиков, Е.М. Костылева; под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та. – Вып. 11. – С. 195–201.

7. Азбелев, Н.В. Элементы современной теории функционально-дифференциальных уравнений. Методы и приложения / Н.В. Азбелев, В.П. Максимов, Л.Ф. Рахматуллина. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 304 с.

8. Дмитриев, С.С. Численное решение систем интегродифференциально-алгебраических уравнений с запаздывающим аргументом / С.С. Дмитриев, Е.Б. Кузнецов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2008. – 3. – С. 430–444.

9. Вержбицкий, В.М. Численные методы. Математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения / В.М. Вержбицкий. – М.: Высш. шк., 2001. – 383 с.

10. Ячиков, И.М. Положение электрических дуг при их электромагнитном взаимодействии в многоэлектродных дуговых печах / И.М. Ячиков, Е.М. Костылева // Информационные технологии и системы: материалы Первой междунар. конф. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2012. – С. 36–38.

11. Ячиков, И.М. Приближенный алгоритм нахождения положения электрических дуг при их электромагнитном взаимодействии в многоэлектродных дуговых печах / И.М. Ячиков, Е.М. Костылева // Теория и практика тепловых процессов в металлургии: сборник докладов международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 423–426.

12. Ячиков, И.М. Взаимодействие дуг / И.М. Ячиков, Е.М. Костылева // Свидетельство о государственной регистрации программы № 2013619388 от 03 октября 2013.

13. Сисоян, Г.А. Электрическая дуга в электрической печи / Г.А. Сисоян. – М.: Металлургия, 1971. – 304 с.

14. Егоров, А.В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей: учеб пособие для вузов / А.В. Егоров. – М.: МИСИС, 2000. – 272 с.

15. Николаев, А.А. Повышение эффективности работы электротехнического комплекса «Дуговая сталеплавильная печь – статический тиристорный компенсатор»: научная монография / А.А. Николаев. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. – 318 с.

Краткие сообщения

16. Емельянов, В.В. Теория и практика эволюционного моделирования / В.В. Емельянов, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 432 с.

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; loginovskiyo@mail.ru.

Костылева Елизавета Марковна, соискатель, кафедра информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; ezaretskaya@yandex.ru.

Ячиков Игорь Михайлович, д-р техн. наук, профессор, кафедра вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; jachickov@mail.ru.

Поступила в редакцию 2 июня 2020 г.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Loginovskiy, O.V. Optimization of the Lining Wear Coefficient on the Basis of Control of Three-phase Current Electric Arcs Characteristics / O.V. Loginovskiy, E.M. Kostyleva, I.M. Yachikov // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 129–134. DOI: 10.14529/ctcr200314

FOR CITATION

Loginovskiy O.V., Kostyleva E.M., Yachikov I.M. Coefficient on the Basis of Control of Three-phase Current Electric Arcs Characteristics. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 129–134. DOI: 10.14529/ctcr200314

BLOCKCHAIN TECHNOLOGY AND THE POSSIBILITIES OF ITS USE

V.V. Zakharov¹, metkol@yandex.ru,

V.L. Rybak², rybak1323@mail.ru

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

²Financial University under the Government of the Russian Federation,
Moscow, Russian Federation

Introduction. With the development of digital technology, most familiar processes are changing. Without information technology, it is already impossible to imagine either medicine or the field of education. Big data and artificial intelligence come to almost every area of society, everything around is becoming “smart”. According to the forecasts of the participants of the St. Petersburg International Economic Forum, held in 2019, the global market for products using artificial intelligence and advanced information technologies can grow by almost 17 times by 2024. A national strategy for the development of technologies in the field of artificial intelligence and information technologies has been prepared in the Russian Federation, and a detailed action plan has been integrated into the national program “Digital Economy”. Digitalization today covers almost all aspects of the interaction of the citizen and business with authorities. Digitalization of business processes takes place, technologies are introduced into the activities of industrial enterprises, in the organization of public services and financial institutions.

Aim. Consider the technology of blockchain, its origin, advantages and disadvantages, as well as the possibilities and prospects of using this technology.

Materials and methods. As part of the materials and methods, one should point to an analysis of the theoretical foundations of the blockchain technology, the practical results of its implementation and use in various fields of activity: from public life to business. Since it is blockchain technology that occupies a special place among the promising information technologies and is increasingly used in business, as well as government, and will undoubtedly affect the familiar picture of the world, how the Internet has changed the world of information exchange in its time.

Results. The article makes an attempt to assess the origin, current state, the possibilities of using blockchain technology, as well as its impact on traditional business processes and socio-economic transformation as a result of the digitalization process.

Conclusion. It is believed that blockchain technology can be a real breakthrough in the field of finance, secure databases and the reliability of certain facts. For the largest foreign and domestic companies, this is not just a concept from an approximate future, but now it is part of the business, and the future life of society as a whole depends on how well it is to use and manage blockchain technology.

Keywords: blockchain technology, digitalization, digital economy.

Introduction

In simple terms, blockchain is a database that is stored and updated simultaneously on different devices. Database management is autonomous and decentralized. The database stores and confirms the accuracy of the information and the safety of this data is provided by cryptographic algorithms. Information with this architecture is stored reliably, since many copies of the same data set are simultaneously stored on computers of an unlimited number of users of the entire system. Depending on the order of access to information, system management, participant’s capabilities, a private blockchain and a public blockchain are distinguished. And each type of system is applicable to individual tasks of the project and to different goals [1–5].

The origin of blockchain technology

There are several versions of the origin of blockchain. The most common version is associated with the development in 2008 by Satoshi Nakamoto of the protocol of the famous Bitcoin cryptocurrency and the alternative infrastructure of the Bitcoin system of the same name. This system is based on the blockchain and quickly entered the business cycle. The second version is historically perhaps more fair.

The technology of software processing distributed databases has been known since the 70s of the last century to programmers and mathematicians who took a special course in “Structures and Algorithms for Data Processing” at higher educational institutions. It’s just that this cryptographic technology, based on the well-known principles of distributed interaction, was not claimed by the business and the business community until a certain point, since there were other more understandable and affordable mechanisms for doing business. The third version of the origin of blockchain technology has a “spy subtext”. Cryptographic data processing algorithms that protect this data from modification and hacking have long been developed and actively implemented in security agencies for military and intelligence purposes [6–10].

Use of blockchain technology

It is worth noting that blockchain is not only cryptocurrency and not only ISEO – international search engine optimization. Blockchain is also a system for registering rights and assets, for example, registration of copyrights, property rights, certification of transactions, etc. Blockchain technology is used in a broad sense to ensure the safety of the storage, use, retrieval and fixing of any kind of information. The bright areas of its application are the following [11–21]:

- transfers of funds and units of virtual currency;
- automatic execution of smart contracts [22, 23];
- confirmation of the origin and identification of complex, special or rare things (objects of art, jewelry);
- maintaining a register of assets, including ISEO, a register of rights, facts or actions;
- secure and anonymous voting;
- conducting trade calculations and logistics;
- improvement of the regime of financial transactions and reduce transaction costs.

In fact, with a competent approach and reliable observance of the unshakable principles of information reliability and data safety, there is practically no limit to the application of blockchain technology. Blockchain can also be actively used in financial markets, in particular when making cross-border interbank payments, for example, as part of the SWIFT system or its analogues. Blockchain technology is also the basis for such actively developing fields of activity around the world as:

- LegalTech – a business sector that provides information technology services for professional legal activities and the provision of legal services to consumers using IT;
- FinTech – a business sector consisting of companies that use technology and innovation to compete with traditional financial institutions represented by banks and intermediaries in the financial services market.

In addition, blockchain as a technology can be the basis for many financial, economic, social and legal processes.

Advantages and disadvantages of blockchain technology

The disadvantages of this technology are mainly technical and legal. For example, there may be doubts about the security of such technology, since the data registry does not have a single control center and can theoretically be hacked. In addition, since the transaction database is not linked to any specific territory or state, the rules for making transactions in different States may cause contradictions and legal conflicts [22]. There are also still open questions about the storage and protection of personal data of participants and users of systems based on blockchain technology, as well as questions about canceling and correcting erroneous or false transactions. At the same time, there is an engineering complexity of modern blockchain solution's architectures [24–26].

Speaking about the advantages of this technology, it should be noted, first of all, the functionality: blockchain is a flexible, open technology with potentially wide opportunities, which allows you to automatically conclude many transactions, register facts, which allows you to reduce the time, costs, and operational risks [27–30].

Conclusion

It is obvious that blockchain technology, as well as global ideas of decentralization, are becoming more and more popular in many areas of public life. Many companies, both in the manufacturing, finan-

cial and social sectors, are working on implementing potentially promising technology for the development of their business. It is worth noting that the capabilities of this technology are already used in completely different spheres of life: from intellectual property rights to electronic medical records, as well as real estate turnover, and can qualitatively change our daily existence, so it is necessary to be prepared for further development and management of such technologies.

References

1. Kosba A. Hawk: The Blockchain Model of Cryptography and Privacy-Preserving Smart Contracts. *2016 IEEE symposium on security and privacy (SP)*, 2016, 839–858 pp.
2. Farmer J.A. The Spector of Crypto-anarchy: Regulating Anonymity-Protecting Peer-To-Peer Networks. *L. Rev*, 2003, vol. 72, pp. 725–725.
3. Zyskind G., Nathan O., Pentland A. Enigma: Decentralized Computation Platform with Guaranteed Privacy. *arXiv preprint arXiv*, 2015, 1506.03471.
4. Wood G. Ethereum: A Secure Decentralised Generalised Transaction Ledger. *Ethereum project yellow paper*, 2014, no. 151, 1–32 pp.
5. Dannen C. *Introducing Ethereum and Solidity*. Berkeley, Apress, 2017. 206 p.
6. Van Saberhagen N. *CryptoNote v 2.0, 2013* [CryptoNote v 2.0, 2013]. Fvailable at: <https://cryptonote.org/whitepaper.pdf> (accessed 02.03.2020)
7. Sun S.F. RingCT 2.0: a Compact Accumulator-Based (Linkable Ring Signature) Protocol for Blockchain Cryptocurrency Monero. *European Symposium on Research in Computer Security*, 2017, pp. 456–474.
8. Noether S. Ring Signature Confidential Transactions for Monero. *IACR Cryptology ePrint Archive*, 2015. 1098 p.
9. Miller A. An Empirical Analysis of Linkability in the Monero Blockchain. *arXiv preprint*, 2017, no. 1704.
10. Sasson E. B. Zerocash: Decentralized Anonymous Payments from Bitcoin. *2014 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, 2014, pp. 459–474.
11. Miers I. Zerocoin: Anonymous Distributed E-Cash from Bitcoin. *2013 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, 2013, pp. 397–411.
12. Hopwood D. Zcash Protocol Specification. Vol. 1.10. Zerocoin Electric Coin Company. *Technical report*, 2016.
13. Nakamoto S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System, 2008.
14. Eyal I., Sirer E.G. Majority is not Enough: Bitcoin Mining is Vulnerable. *Communications of the ACM*, 2018, vol. 61, no. 7, pp. 95–102.
15. Reid F., Harrigan M. An Analysis of Anonymity in the Bitcoin System. *Security and Privacy in Social Networks*, 2013, pp. 197–223.
16. Buterin V. Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform [A Smart-kontrakt sleduyushchego pokoleniya i detsentralizovannaya prikladnaya platforma], *Ethereum White Paper*, 2014, pp. 1–36.
17. Clack C.D., Bakshi V.A., Braine L. Smart Contract Templates: Foundations, Design Landscape and Research Directions, *arXiv: 1608.00771v3*, 2016, pp. 1–15.
18. Bartoletti M., Pompianu L. An Empirical Analysis of Smart Contracts: Platforms, Applications and Design Patterns. *International Conference on Financial Cryptography and Data Security*, 2017, pp. 494–509.
19. Bartoletti M., Pompianu L. An Empirical Analysis of Smart Contracts: Platforms, Applications and Design Patterns. *International Conference on Financial Cryptography and Data Security*, 2017, pp. 494–509.
20. Duffield E., Hagan K. Darkcoin: PeertoPeer CryptoCurrency with Anonymous Blockchain Transactions and an Improved ProofofWork System [Darkcoin: kriptovalyuta PeertoPeer s anonimnymi tranzaktsiyami blokcheyna i uluchshennoy sistemoy ProofofWork], 2014.
21. Duffield E., Diaz D. Dash: A PrivacyCentric CryptoCurrency, 2015.
22. Raskin M. The Law and Legality of Smart Contracts [Zakon i zakonnost' smart-kontraktov], 2016.

23. Yuan R. ShadowEth: Private Smart Contract on Public Blockchain. *Journal of Computer Science and Technology*, 2018, vol. 33, no. 3, pp. 542–556.
24. Ruj S. BlockStore: A Secure Decentralized Storage Framework on Blockchain. *2018 IEEE 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, 2018, pp. 1096–1103.
25. Sánchez D.C. Raziel: Private and Verifiable Smart Contracts on Blockchains [*Raziel': chastnyye i proveryayemye smart-kontrakty na blokcheynakh*], 2018.
26. Cheng R. Ekiden: A Platform for Confidentiality-Preserving, Trustworthy, and Performant Smart Contract Execution [*Platforma dlya sokhraneniya konfidentsial'nosti, nadezhnosti i effektivnosti ispolneniya smart-kontraktov*], 2018.
27. Swan M. Blockchain: Blueprint for a new economy [*Blokcheyn: proyekt novoy ekonomiki*], 2015.
28. Zyskind G. Decentralizing Privacy: Using Blockchain to Protect Personal Data. *Security and Privacy Workshops (SPW)*, 2015, pp. 180–184.
29. Cachin C. Architecture of the Hyperledger Blockchain Fabric. *Workshop on Distributed Cryptocurrencies and Consensus Ledgers*, 2016, vol. 310.
30. Guo Y., Liang C. Blockchain Application and Outlook in the Banking Industry. *Financial Innovation*, 2016, vol. 2, no. 1, pp. 24–24.

Received 14 June 2020

УДК 004.9

DOI: 10.14529/ctcr200315

ТЕХНОЛОГИЯ BLOCKCHAIN И ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

В.В. Захаров¹, В.Л. Рыбак²

¹Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

²Финансовый университет при Правительстве РФ, г. Москва, Россия

Введение. С развитием цифровых технологий меняется большинство привычных процессов. Без информационных технологий уже невозможно представить ни медицину, ни сферу образования. Большие данные и искусственный интеллект приходят практически в каждую сферу жизни общества, все вокруг становится «умным». По прогнозам участников Петербургского международного экономического форума, проходившего в 2019 году, мировой рынок продуктов с использованием искусственного интеллекта и перспективных информационных технологий к 2024 году может вырасти почти в 17 раз. В Российской Федерации подготовлена национальная стратегия развития технологий в области искусственного интеллекта и информационных технологий, а детальный план действий интегрирован в национальную программу «Цифровая экономика». Цифровизация сегодня охватывает почти все стороны взаимодействия гражданина и бизнеса с органами власти. Происходит цифровизация бизнес-процессов, технологии внедряются в деятельность промышленных предприятий, в организацию государственных услуг и финансовых учреждений.

Цель исследования. Рассмотреть технологию blockchain, ее происхождение, достоинства и недостатки, а также возможности и перспективы применения данной технологии.

Материалы и методы. В составе материалов и методов следует указать на анализ теоретических основ технологии blockchain, практических результатов ее внедрения и использования в различных сферах деятельности – от общественной жизни до бизнеса, так как именно технология blockchain занимает особое место в ряду перспективных информационных технологий и находит все большее применение в сфере бизнеса, а также государственного управления и, несомненно, повлияет на привычную картину мира, как в свое время Интернет изменил мир обмена информацией.

Результаты. В статье делается попытка оценить происхождение, текущее состояние, возможности использования технологии blockchain, а также ее влияние на традиционные бизнес-процессы и социально-экономическую трансформацию в результате процесса цифровизации.

Заключение. Считается, что технология blockchain способна стать настоящим прорывом в области финансов, защищенных баз данных и достоверности тех или иных фактов. Для крупнейших зарубежных и отечественных компаний это не просто понятие из приближенного будущего, а уже сейчас часть бизнеса, и от того, насколько грамотно подходить к применению и управлению технологией blockchain, зависит и будущая жизнь общества в целом.

Ключевые слова: технология blockchain, цифровизация, цифровая экономика.

Захаров Вадим Владимирович, инженер кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; metkol@yandex.ru.

Рыбак Вадим Львович, студент 2-го курса магистратуры, Финансовый университет при Правительстве РФ, г. Москва; rybak1323@mail.ru.

Поступила в редакцию 14 июня 2020 г.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Zakharov, V.V. Blockchain Technology and the Possibilities of Its Use / V.V. Zakharov, V.L. Rybak // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 135–139. DOI: 10.14529/ctcr200315

FOR CITATION

Zakharov V.V., Rybak V.L. Blockchain Technology and the Possibilities of Its Use. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 135–139. DOI: 10.14529/ctcr200315

КОММУНИКАЦИЯ КАК КЛЮЧЕВОЙ ЭЛЕМЕНТ ПОСТРОЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ КОРПОРАТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А.А. Шинкарев¹, М.Е. Коваль²

¹ООО «Софтмаст-ИТ», г. Челябинск, Россия,

²Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Введение. На сегодняшний день в мире используется большое количество методик и подходов к управлению процессом разработки корпоративных информационных систем. Но не многие организации, использующие те или иные методологии, понимают, насколько важен отлаженный процесс коммуникации между отдельными группами сотрудников, которые трудятся над созданием корпоративных информационных систем различного рода.

Цель исследования. Обосновать необходимость построения и отладки системы коммуникации внутри компаний и между ними, а также показать, насколько ценно вкладывать ресурсы в это направление развития процессов, целью которых является повышение эффективности деятельности компании.

Материалы и методы. Рассматриваются исследования компаний по изучению мотивации соискателей при устройстве на работу. Анализируются основные положения Agile-манифеста. Дается оценка последствиям недостаточной коммуникации или нарушения ее функционирования.

Результаты. В статье авторами делается попытка оценить негативное воздействие на операционные издержки в работе ИТ-подразделения вследствие неотлаженной или нарушенной коммуникации внутри команды. Также обосновывается важность ролей владельца продукта и Scrum-мастера в работе успешной и эффективной команды. Даются практические советы по построению и налаживанию системы коммуникации в команде и по тому, как распространить создаваемую внутрикорпоративную культуру общения с уровня команды на уровень всей компании для дальнейшего успешного развития всего бизнеса в целом и отдельных проектов в частности.

Ключевые слова: корпоративные информационные системы, коммуникация, процесс, методологии, Agile, Scrum-мастер, владелец продукта.

Введение

Когда мы говорим о создании корпоративных информационных систем, на ум приходит множество важных составляющих. Это и технические решения, и организационные, и иногда маркетинговые. Однако зачастую мы не задумываемся в явном виде о коммуникации как о связующем элементе этих составляющих, а зря. Без отлаженной коммуникации невозможно представить успешное развитие предприятия и его проектов. Проблема недостаточной коммуникации проявляется особенно остро, если сотрудники компании работают удаленно. Успешно построенное общение между командами разработки, тестирования, бизнес-анализа, внедрения и бизнесом как таковым – это залог эффективного решения задач, стоящих перед предприятием.

С бурным развитием рынка труда и трудосберегающих технологий такие понятия, как «пожизненный найм», потеряли актуальность. Сегодня небольшие компании готовы поощрять сотрудников наравне с крупными организациями. Наибольшее значение при выборе места работы имеет стабильность организации, перспективы ее развития, возможность самореализации сотрудников [1]. Поэтому отлаженный процесс внутрикорпоративной коммуникации является не только частью общего процесса создания корпоративных информационных систем, но и важнейшей частью репутационного менеджмента компании [2].

1. Важность выбора подходящей методологии управления разработкой проектов

На текущий момент создано и используется множество методологий разработки и управления проектами. Применение любой методологии управления разработкой программного обеспечения должно ставить своей целью успешное выполнение проекта. Это может быть краткосроч-

ная цель для небольших по длительности работ, когда важно эффективно потратить имеющиеся ресурсы бюджета, времени и специалистов и закончить проект. Также успешным выполнением может быть длительная плодотворная работа над продуктом, которая не прекращается до тех пор, пока проект не закрыт.

Методологии разработки используются для выстраивания грамотного и продуктивного процесса создания нового продукта. Процесс сам по себе должен связывать воедино бизнес, исполнителей, клиентов и конечный продукт. Важно понимать, что любой конкретный метод или фреймворк, как, например, Scrum, необходимо подстраивать и адаптировать под каждую конкретную команду. Можно слепо следовать всем рекомендациям и указаниям, которые предлагает методология, но, скорее всего, это не повысит эффективность и успешность разработки. Нужно проводить анализ той или иной методологии и брать из нее то, что действительно может помочь в процессе создания продукта. В том числе следует принимать во внимание, что с течением времени вместе с развитием команды и налаживанием взаимодействия в ней должен развиваться и процесс, которого она придерживается [3, 4].

Среди существующего множества различных методологий хочется остановиться именно на гибкой методологии разработки программного обеспечения под названием Agile. Именно в рамках нее удастся выстраивать наиболее адаптируемый к изменяющимся условиям процесс работы команды [5].

2. Гибкие методологии разработки программного обеспечения Agile

Agile – это семейство гибких итеративно-инкрементальных методов управления проектами и продуктами. Сам по себе Agile – не метод управления проектами. Это скорее набор идей и принципов того, как нужно реализовывать проекты. Уже на основе этих принципов и лучших практик разработаны отдельные гибкие методы или, как их иногда называют, фреймворки (frameworks): Scrum, Kanban, Crystal и многие другие. Эти методы могут достаточно сильно отличаться друг от друга, но они следуют одним и тем же принципам [6].

Эти принципы отражены в Agile-манифесте [7] (Agile Manifesto):

- 1) люди и взаимодействие важнее процессов и инструментов;
- 2) работающий продукт важнее исчерпывающей документации;
- 3) сотрудничество с заказчиком важнее согласования условий контракта;
- 4) готовность к изменениям важнее следования первоначальному плану.

В упомянутой выше методологии Scrum выделяют такие роли, как: команда разработки (Development Team), Scrum-мастер (Scrum Master) и владелец продукта (Product Owner). В процессе построения коммуникации и улучшения процесса разработки наиболее важна роль Scrum-мастера. Именно этот человек отвечает за рабочий процесс, эффективность коммуникации, развитие команды и экосистемы, а в более зрелых организациях – за корпоративную культуру в целом. Scrum-мастер помогает выстроить эффективную коммуникацию в команде, в том числе за счет прозрачности процесса выявления и эскалирования проблем и открытых вопросов. Scrum-мастер также следит за соблюдением процессов в команде, ее вовлеченностью в работу [8].

В отличие от роли Scrum-мастера, роль владельца продукта (Product Owner) заключается в контроле за тем, что именно разрабатывает команда в рамках продукта. Владелец продукта в ответе за его целостность, непротиворечивость и функциональную значимость для конечных пользователей системы. Этот человек определяет сами задачи и их приоритеты. В его власти отказаться от реализации конкретной задачи в угоду срокам, бюджету, его видению продукта как единого целого. Сильный владелец продукта с одной стороны берет на себя всю полноту ответственности за качество принимаемых решений, а с другой – оказывает необходимую помощь команде в определении вектора развития проекта [9].

Непонимание истинных причин возникновения той или иной потребности бизнеса зачастую приводит к некорректной реализации проекта. Под некорректной реализацией подразумевается то, что работающий проект не решает проблему бизнеса, ради которой он создавался. Проблема недостаточной коммуникации, неумение задавать нужные открытые вопросы бизнес-представителям, а также недостаточная вовлеченность конечных владельцев продукта на всех этапах жизненного цикла проекта – все это ведет к созданию неправильно работающего программного обеспечения.

3. Проблема недостаточной вовлеченности бизнеса в проект

Сложной проблемой может оказаться вовлечение бизнеса в проект. Так как продукт создается в первую очередь для решения проблем бизнеса, то очень важен уровень его вовлеченности и заинтересованности в успешной реализации проекта. Можно даже сказать, что без должного интереса и трудозатрат со стороны бизнеса немногие проекты добиваются успеха [10]. Важным фактором здесь является квалификация, размер команды и степень ее автономности в принятии решений. Дизайн-мышление, лежащее в основе работы такой команды, может быть вполне жизнеспособным решением проблемы чрезмерной загруженности представителей бизнеса. В таком случае бизнес должен привлекаться на так называемых демо-показах, где можно продемонстрировать направление работы, при необходимости скорректировать его на месте и получить ценную обратную связь. При таком подходе важна ритмичность этих демонстраций, без срывов сроков и нарушения договоренностей. Положительный побочный эффект такого режима работы – это сокращение времени вывода проекта или его обновлений конечным пользователям. Также представителям бизнеса следует своевременно отвечать на вопросы касательно разрабатываемой системы, ее поведения и других требуемых функциональных особенностей [11–13].

4. Проблема недостаточно развитой системы коммуникации

Здоровое общение между коллегами в команде является важной составляющей успеха. Отсутствие естественного постоянного контура взаимодействия является проблемой. Особенно остро такая проблема может проявляться, если команда распределенная, то есть не все члены рабочей группы находятся в одном офисном пространстве [14]. Члены команды задают друг другу вопросы и получают ответы в онлайн-чатах. Но нередко возникает ситуация, когда вопрос задан, а ответа на него не последовало. Нельзя оставлять без ответа сообщения коллег. Современные системы онлайн-общения позволяют получать автоподтверждения о прочтении сообщений. Однако человек мог просмотреть сообщение, но никак не зафиксировать его в своей голове, попросту говоря, пропустить мимо ушей. Среди возможных причин ситуации, когда сообщение прочитано, но в то же время пропущено, можно выделить следующие:

- 1) внезапное переключение контекста на другую задачу;
- 2) желание обдумать ответ на сообщение с последующим забыванием;
- 3) большой объем пришедших разом сообщений, из-за чего сообщение могло выпасть из поля зрения;
- 4) случайное прочтение сообщения в момент его получения при переключении диалога на другой.

Это лишь некоторые из очевидных и распространенных случаев, когда о сообщении забыли или вовсе не увидели его, в то время как отправитель получил уведомление о прочтении. Безусловно, существуют и другие более экзотические способы «потери» сообщений и, что важно, информации, которую они содержат. В результате важная информация от бизнеса может не дойти до разработчика, и какая-то из задач будет реализована неверно или не в полном объеме из-за изменившихся требований [15].

Поэтому крайне важно отвечать на сообщения в явной форме, пусть даже в виде простейшего ответа, который подтверждает получение письма. Это дает отправителю понимание того, что получатель принял к сведению информацию, изложенную в письме. В электронной переписке полезным приемом является добавление в конце сообщения просьбы подтвердить получение или открытого вопроса касательно мнения получателя по теме письма [16]. Явный ответ о получении сообщения освобождает общение от двусмысленности и неоднозначности, дает базовые, в том числе юридические, гарантии того, что информация получена, принята к сведению и что имеются или отсутствуют возражения.

В случае если культура общения в команде еще не на требуемом уровне, важно не бояться отправить повторно ценное сообщение, ответа на которое вы особенно ожидаете. В свете вышеизложенных причин – это нормальная практика. Ответственность за неполучение необходимого ответа своевременно может быть возложена на отправителя в случае, если тот не посчитал необходимым держать руку на пульсе, контролировать и направлять процесс принятия решения по данному вопросу [13]. Важно понимать, что простой в принятии решения по причине потери сообщения лишь кажется незначительной проблемой, но в действительности это может привести как минимум к

пустой трате рабочего времени или серьезным материальным и репутационным потерям. Системное же выражение такого подхода к работе вызывает куда большие издержки, волокиту и неопределенность. Приведем известную восточную мудрость, иллюстрирующую излагаемый взгляд на важность культуры общения и цену, которую можно заплатить при ее низком уровне: «Из-за забитого гвоздя потеряли подкову, из-за потерянной подковы потеряли лошадь, из-за потерянной лошади гонец не доставил послание, из-за недоставленного послания проиграли войну».

5. Важность развития личных навыков общения

Навык общения в современном мире информационных технологий является таким же базовым и необходимым, как навык написания программ на языке программирования. Бывают случаи, когда члену команды нужно неотложно получить ответ от бизнеса на вопрос, возникший во время реализации задачи. И если у сотрудника недостаточно развиты коммуникативные навыки (часто сегодня обобщаемые до Soft Skills), то вопрос может быть поставлен некорректно или двусмысленно интерпретирован бизнесом. Логично предположить, что в таком случае решение задачи пойдет в неверном направлении. А это уже способно привести к потерям, о которых идет речь в статье [17].

Одно из самых неприятных последствий слабого навыка общения – это конфликт между участниками команды разработки или же между участником проекта и представителем бизнеса. Человеческий фактор нельзя сбрасывать со счетов, и без умения контролировать эмоции и вести общение с людьми невозможно выстроить дружескую атмосферу в команде.

Заключение

В свете изложенного в статье можно сделать вывод, что коммуникация играет важную роль при построении корпоративных информационных систем. Но для того чтобы выстроить грамотную и эффективную систему коммуникации, нужно проводить анализ процессов, протекающих в команде, стараться их улучшить и использовать наиболее эффективно в рамках реализуемой системы.

В настоящее время широко используются методологии, которые следуют принципам Agile. Многие крупные компании внедрили в своей работе некоторые из этих принципов и положений. Опираясь на опыт этих компаний, можно прийти к выводу о том, что использование Agile-методологий в том числе позволяет наладить коммуникацию внутри организации. Однако при использовании каких-либо методологий управления процессом разработки и управления проектами следует не только изучать лучшие практики их внедрения, но и адаптировать их под нужды конкретной команды. Большое внимание стоит уделить развитию навыков общения внутри коллектива, поскольку одно непочитанное сообщение или неверно поставленный вопрос могут иметь серьезные последствия как для проекта, так и для бизнеса в целом. Однако право на ошибку должно быть у всех, и лишь постоянно повторяющиеся осознанные нарушения общепринятого процесса одним из членов команды могут нести поистине разрушительный характер для согласованной работы команды.

Литература

1. Коммуникация в IT-отрасли. – <https://www.raso.ru/news/24346>.
2. Сальникова, Л. С. Репутационный менеджмент. Современные подходы и технологии / Л.С. Сальникова. – М.: Изд-во Юрайт, 2015. – 303 с.
3. Jennifer, D. *Effective DevOps: Building a Culture of Collaboration, Affinity, and Tooling at Scale* / D. Jennifer, K. Daniels. – Newton: O'Reilly Media, 2016. – 410 с.
4. Loginovsky, O. *Supercomputing Technologies as Drive for Development of Enterprise Information Systems and Digital Economy* / O. Loginovsky, A. Shestakov, A. Shinkarev // *Supercomputing Frontiers and Innovations*. – 2020. – P. 55–70. DOI:10.14529/jsfi200103.
5. Todaro, D. *The Epic Guide to Agile: More Business Value on a Predictable Schedule with Scrum Paperback* / D. Todaro. R9 Publishing LLC, 2019. – 518 с.
6. Guay, M. *Project management 101: The complete guide to Agile, Kanban, Scrum and beyond* / M. Guay. – <https://zapier.com/learn/project-management/project-management-systems>.
7. *Manifesto for Agile Software Development*. – <https://agilemanifesto.org>.
8. Šochová, Z. *The Great ScrumMaster: #ScrumMasterWay* / Z. Šochová. – 1 ed. – Boston: Addison-Wesley Professional, 2017. – 168 с.

9. Adkins, L. *Coaching Agile Teams: A Companion for ScrumMasters, Agile Coaches, and Project Managers in Transition* / L. Adkins. – Boston: Addison-Wesley Professional, 2010. – 352 с.
10. Pinto, M.B. *Project Team Communication and Cross-Functional Cooperation in New Program Development* / M.B. Pinto, K.J. Pinto // *Journal of Product Innovation Management*. – 1990. – No. 7.
11. *Эффективное управление организационными и производственными структурами: монография* / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др. – М.: ИНФРА-М, 2020. – 450 с.
12. Kirkpatrick, D.L. *Managing Change Effectively Approaches, Methods, and Case Examples* / D.L. Kirkpatrick. – Woburn: Butterworth-Heinemann, 2001. – 280 с.
13. Moeller, R.R. *IT Governance Issues: Project and Program Management* / R.R. Moeller. – 1 ed. – Hoboken: Wiley, 2013. – 416 с.
14. Киселева, М.С. *Ключевые элементы эффективной системы коммуникаций* / М.С. Киселева // *Молодой ученый*. – 2017. – № 50. – С. 157–160.
15. Cervone, F.H. *Effective communication for project success* / F.H. Cervone // *European Journal of Marketing*. – 2014. – No. 30.
16. Janda, M. *Burn Your Portfolio: Stuff They Don't Teach You in Design School But Should* / M. Janda. – 1 ed. – San Francisco: New Riders, 2013. – 399 с.
17. Zentner, A. *Communication Skill Development: An Antecedent to Leadership Effectiveness* / A. Zentner // *SSRN Electronic Journal*. – 2016. – No. 11.

Шинкарев Александр Андреевич, канд. техн. наук, инженер-программист, ООО «Софт-маст-ИТ», г. Челябинск; sania.kill@mail.ru.

Коваль Максим Евгеньевич, магистр, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kovalmax06@gmail.com.

Поступила в редакцию 15 мая 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr200316

COMMUNICATION AS KEY ASPECT IN DEVELOPMENT OF BENEFICIAL ENTERPRISE INFORMATION SYSTEMS

A.A. Shinkarev¹, sania.kill@mail.ru,
M.E. Koval², kovalmax06@gmail.com

¹“Softmast-IT” Ltd, Chelyabinsk, Russian Federation

²South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Introduction. Nowadays there are numerous techniques and approaches widely used in the management of enterprise information systems development. However, few organizations that use certain methodology understand the importance of efficient communication between teams of employees that develop enterprise information systems of various kinds.

The purpose of the study was to justify the need for building and mending communication systems within and between companies, as well as to show how valuable it is to invest in this area of processes development aimed to improve the company’s efficiency.

Materials and methods. The paper considers findings of companies regarding job applicants’ motivation. The authors analyze the main principles behind the Agile Manifesto, and assess the consequences of inadequate or broken communication.

Results. In the paper, the authors attempt to assess how poor or inadequate communication within a team affects operating costs of the IT department. The authors also rationalize why the roles of a product owner and Scrum Master are so important in the work of a successful and effective team. Practical advice is given on building and improving the system of communication in a team, as well as spreading the evolving internal communication culture from the team level to the

level of the entire company for the further successful development of the business as a whole and individual projects in particular.

Keywords: enterprise information systems, communication, process, methodology, Agile, Scrum Master, Product Owner.

References

1. *Kommunikatsiya v IT-otrasli* [Communication in the IT Industry]. Available at: <https://www.raso.ru/news/24346> (accessed 23.04.2020)
2. Salnikova L.S. *Reputatsionnyy menedzhment. Sovremennyye podkhody i tekhnologii* [Reputation management. Modern approaches and technologies]. Moscow, Yurait Publishing House, 2015. 303p.
3. Jennifer D., Daniels K. *Effective DevOps: Building a Culture of Collaboration, Affinity, and Tooling at Scale*. Newton, O'Reilly Media, 2016. 410 p.
4. Loginovsky O., Shestakov A., Shinkarev A. Supercomputing Technologies as Drive for Development of Enterprise Information Systems and Digital Economy. *Supercomputing Frontiers and Innovations*, 2020, vol. 1, pp. 55–70. DOI: <http://dx.doi.org/10.14529/jsfi200103>.
5. Todaro D. *The Epic Guide to Agile: More Business Value on a Predictable Schedule with Scrum Paperback*. R9 Publishing LLC, 2019. 518 p.
6. Guay M. *Project management 101: The complete guide to Agile, Kanban, Scrum and beyond*. Available at: <https://zapier.com/learn/project-management/project-management-systems/>. (accessed 23.04.2020).
7. *Manifesto for Agile Software Development*. Available at: <https://agilemanifesto.org/> (accessed 23.04.2020).
8. Šochová Z. *The Great ScrumMaster: #ScrumMasterWay*. Boston, Addison-Wesley Professional, 2017. 168 p.
9. Adkins L. *Coaching Agile Teams: A Companion for Scrum Masters, Agile Coaches, and Project Managers in Transition*. Boston, Addison-Wesley Professional, 2010. 352 p.
10. Pinto M.B., Pinto K.J. Project Team Communication and Cross-Functional Cooperation in New Program Development. *Journal of Product Innovation Management*, 1990, no. 7.
11. Loginovsky O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *Effektivnoye upravleniye organizatsionnymi i proizvodstvennymi strukturami: monografiya* [Effective Management of Organizational and Production Structures: Monograph]. Moscow, INFRA-M, 2020, 450 p.
12. Kirkpatrick D.L. *Managing Change Effectively Approaches, Methods, and Case Examples*. Woburn, Butterworth-Heinemann, 2001. 280 p.
13. Moeller R.R. *IT Governance Issues: Project and Program Management*. Wiley, 2013. 416 p.
14. Kiseleva M. S. [Key Elements of an Effective Communication System]. *Young scientist*, 2017, no. 50, pp. 157–160. (in Russ.)
15. Cervone F.H. Effective communication for project success. *European Journal of Marketing*, 2014. no. 30.
16. Janda M. *Burn Your Portfolio: Stuff They Don't Teach You in Design School, But Should*. San Francisco, New Riders, 2013. 399 p.
17. Zentner A. Communication Skill Development: An Antecedent to Leadership Effectiveness. *SSRN Electronic Journal*, 2016. no. 11.

Received 15 May 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шинкарев, А.А. Коммуникация как ключевой элемент построения полезных корпоративных систем / А.А. Шинкарев, М.Е. Коваль // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 140–145. DOI: 10.14529/ctcr200316

FOR CITATION

Shinkarev A.A., Koval M.E. Communication as Key Aspect in Development of Beneficial Enterprise Information Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 140–145. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200316

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ИНФОРМАЦИОННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВРЕМЕННЫМИ РЕСУРСАМИ В ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ОБЛАСТИ (НА ПРИМЕРЕ УПРАВЛЕНИЯ РАСПИСАНИЕМ ЗАНЯТИЙ УНИВЕРСИТЕТА)

Г.Г. Куликов, В.А. Суворова, М.А. Шилина, А.К. Хисаметдинова

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

Введение. Парадигма цифровой трансформации ресурсного управления в производственных системах основана на интеллектуальной интеграции виртуальных и реальных процессов с объектами производства (их атрибутивными моделями). При этом платформой (средой) интеллектуальной интеграции виртуальных и реальных процессов выступает информационная среда предметно ориентированной области. Функции специалистов в этом случае сводятся к роли экспертов, которые реализуют формальные предикатные знания, прописанные в соответствующих методиках и должностных инструкциях (документах). При этом обеспечиваются свойства идентифицируемости, прослеживаемости и повторяемости (полного отката) процессов. Временной ресурс – важнейший фактор в организации управления предметно-ориентированными областями (ПОО). Автоматизация процессов организации, планирования и мониторинга временных ресурсов в реальном и виртуальном аспектах является важной и актуальной задачей. Расписание – одна из основных составляющих организации любого процесса. Необходимо отметить, что процесс составления расписания – довольно трудоемкий и объективный.

Цель исследования. Рассмотреть системную модель (системное описание) трансформации процесса управления расписанием с использованием цифровой информационной платформы, отвечающей требованиям 4-го уровня зрелости, позволяющей решать актуальные задачи в заданном аспекте в ПОО. Разработать методику реализации данной системной модели.

Методы исследования, использованные в работе:

– принципы методологии системной инженерии (процессного подхода, жизненного цикла и др.);

– комплексный подход и структурный анализ процесса проектирования по методологии SADT (Structured Analyze and Design Technology);

– функциональное моделирование (в нотации IDEF0).

Результаты. Предложен метод системного моделирования (системного описания ПОО) процессов, связанных временными ресурсами, из условия формализованной идентифицируемости и прослеживаемости их в атрибутивной модели ПОО.

На примере УГАТУ показано, что данная интеллектуализированная системная модель (системное описание ПОО) может быть реализована на базе цифровой программной аналитической платформы в информационном пространстве указанных при описании электронных документов функциональных подразделений учебного заведения.

Заключение. Разработанный подход системного функционального моделирования на основе цифровой платформы, отвечающей требованиям 4-го уровня зрелости, позволяет решать актуальные задачи интеллектуализированного управления в предметно-ориентированной области.

Ключевые слова: системное моделирование (системное описание), предметно-ориентированная область университета, временные ресурсы, информационная система (платформа) университета, расписание занятий, система «1С. Предприятие».

Введение

Известно, что необходимыми системно-техническими условиями для постановки и решения задачи интеллектуализации и автоматизации процессов управления в выделенной ПОО являются требования информационной зрелости самой информационно-управляющей системы (ИУС) не ниже 4 уровня [1–3].

Исследуем подход к интеллектуализации и автоматизации процессов управления на примере системного моделирования (системного описания) и мониторинга процесса расписания университета как виртуального и реального процессов управления временным ресурсом [4]. Полагаем, что уровень информационной зрелости университета, его информационной среды ИУС выше четырёх.

Рассмотрим процесс составления расписания занятий в Уфимском государственном авиационном техническом университете (далее УГАТУ) как он есть на текущий момент. Составлением расписания занятий и экзаменов занимается бюро расписаний. Данное бюро относится к отделу организации учебного процесса учебного управления УГАТУ. Полагаем, что вся информация по составлению расписания занятий идентифицирована соответствующими классификаторами и справочниками и отмечена ссылками в положении и инструкции работников бюро. Весь процесс составления расписания занятий происходит по шаблону предыдущих форм и опыта специалистов «вручную». С помощью Программы «1С: Предприятие» обеспечивается анализ и доступ к составленному расписанию.

Функциональная формализация процесса составления расписания занятий включает в себя несколько шагов: сбор и анализ входящих данных, обработка этой информации, составление расписания занятий, внесение составленного расписания в базу программы «1С: Предприятие». Каждый этот шаг разделяется на множество подзадач. Составление расписания зависит и от курса, на котором учится данная группа. У каждого курса бакалавриата, специалитета и магистратуры есть свои особенности, специфика составления.

В платформе «1С: Предприятие» развернута необходимая часть общей базы данных университета. Для сотрудников бюро расписаний доступна информационная база «Расписание». В данной базе данных содержится список всех преподавателей, аудиторий, список учебных групп с наименованиями предметов для каждого учебного семестра, количеством студентов. После составления расписания занятий в бумажном варианте все расписание вводится в базу данных программы «1С: Предприятие». Далее это расписание переводится на официальный сайт УГАТУ.

На рис. 1 показана контекстная диаграмма описанного процесса составления расписания занятий в нотации IDEF0.



Рис. 1. Контекстная диаграмма процесса составления расписания занятий «как есть»
Fig. 1. Context diagram of the process of scheduling classes «as is»

Краткие сообщения

На определенном этапе сбора и обработки информации подразделение, занимающееся формированием расписания, в той или иной степени сталкивается с рядом проблем:

- несистематизированные данные и документы;
- трудоемкий интеллектуальный функциональный процесс сбора и анализа актуализированных данных для эффективного использования временных, материальных и др. ресурсов (занятости по времени аудиторного фонда, обеспечение средствами информатизации и др.);
- инциденты, связанные с человеческими отношениями;
- необходимость постоянного мониторинга для обеспечения стабильной связи с другими отделами университета для уточнения или дополнения данных по предоставленным документам.

Сегодня контроль проведения занятий происходит по запросу от учебного управления или изредка от инициативы сотрудников бюро расписаний. Иногда деканаты университета также проявляют личную инициативу и проводят контроль занятий или экзаменов. Данный процесс тоже выборочный и непостоянный. Триггером для начала процесса является формирование запроса на проверку занятий от учебного управления в бюро расписаний. Обычно данный запрос состоит из указанного периода времени, за который необходимо провести проверки проведения занятий. Далее сотрудник бюро расписаний выборочно из расписания занятий отбирает и составляет список учебных групп и аудиторий для проверки. И в определенное время выделенные для этой проверки сотрудники, руководствуясь сформированным списком, проверяют каждую аудиторию. В процессе проверки происходит сбор следующей информации:

- наименование учебных групп, которые находятся в указанных аудиториях;
- ФИО преподавателя и кафедры, на которой он преподает;
- время проверки.

Далее сотрудником бюро расписаний анализируются полученные данные на соответствие расписанию занятий, а именно на:

- соответствие времени проверки и учебной группы;
- соответствие учебной группы и преподавателя;
- соответствие учебной группы и аудитории.

Если несоответствия найдены по отношению к преподавателю, то далее этот вопрос решает кафедра, к которой относится преподаватель. Если несоответствия найдены по отношению к учебной группе, то решает этот вопрос деканат факультета, к которой принадлежит учебная группа. Сотрудник бюро расписаний звонит в соответствующий вопросу отдел и указывает на расхождение с расписанием. Далее уже эти отделы выясняют причины несоответствия фактических данных с расписанием занятий. И они передают найденную информацию сотруднику бюро расписаний. Сотрудник уже на основании всех этих собранных данных составляет отчет о проверке проведения занятий и передает его в учебное управление университета. Отчет содержит в себе: список учебных групп с указанием преподавателей, которые соответствуют расписанию занятий, список учебных групп и преподавателей, по отношению к которым были найдены расхождения с расписанием, с указанием причины расхождения.

Учет рабочего времени преподавателей осуществляется на основе преподавательской нагрузки, которую предоставляют кафедры. Отдел, ответственный за оплату зарплаты преподавателю, ориентируется лишь на документ, который ему предоставили. Автоматический инструмент учета рабочего времени преподавательского состава отсутствует. Очевидно, что повысить эффективность и качество данных процессов – планирования, мониторинга, контроля и управления, связанных временным ресурсом – расписанием, – можно прежде всего путем автоматизации идентифицируемости, прослеживаемости данных, характеризующих ресурсы и процессы их обработки. Это обеспечивается методами и средствами системной инженерии [5, 10–13].

Разработка универсальной модели формирования расписания, её реализация и дальнейший мониторинг позволят построить адаптивную систему с возможностью эффективного реагирования к изменению внешних данных [6–9, 12].

Предлагается системная модель автоматизации процесса составления расписания занятий по правилам логики планирования и управления предприятием, реализованным в программе «1С: Автоматизированное составление расписания» с платформой «1С: Предприятие», имеющей структуру и функционал, отвечающий основным требованиям КИС класса ERP [14].

Функционал программы позволяет реализовывать программную многовариантную системную модель составления расписания в трех режимах: ручном, автоматическом, смешанном:

- расписание можно составлять по помещениям, по группам и преподавателям;
- расписание составляется в форме «шахматки», что удобно для быстрой ручной модификации расписания перетаскиванием «drag&drop»;
- составляется несколько вариантов расписания и выбирается лучший среди них.

Важная функция в данной программе – оптимизация учебных расписаний по количеству используемых помещений и минимизации количества окон.

Процесс составления расписания занятий после автоматизации:

- ввод первичной информации: курсы, группы, дисциплины, преподаватели, помещения;
- ввод учебного плана на семестр, в котором указывается, кто, для кого, какое занятие и в каком объеме должен провести;
- ввод ограничений и предпочтений на преподавателей, студентов, помещения;
- составление учебного расписания;
- при вводе нового расписания необходимо заполнить следующие реквизиты: семестр; сценарий («пессимистичный», оптимистичный); кафедра, тип расписания; период, на который составлено расписание.

На рис. 2 описана функциональная модель процесса составления расписания занятий после внедрения программы «1С: Автоматизированное составление расписания».

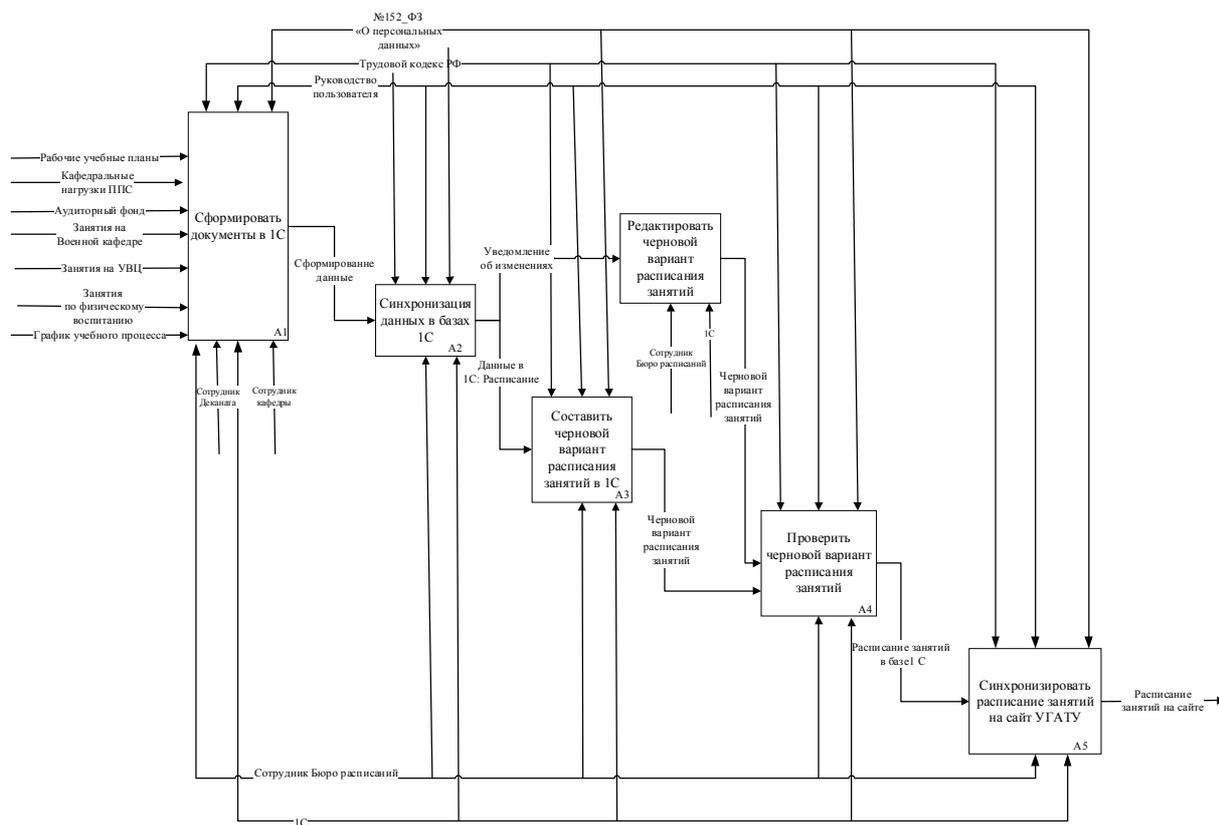


Рис. 2. Функциональная модель процесса составления расписания занятий после автоматизации
Fig. 2. Functional model of the process of scheduling classes after automation

Для автоматизации процесса мониторинга проведения занятий в университете можно использовать системы контроля и управления доступом (далее СКУД) в интеграции с «1С: Предприятие».

На схеме рис. 3 приведен пример ИТ-ландшафта в информационной среде УГАТУ (для 4-го уровня информационной зрелости) для определения атрибутивной модели ресурсов преподавателя, кафедры, университета и др., связанных временным ресурсом «Расписание».

Краткие сообщения

Для обеспечения идентифицируемости и прослеживаемости ресурсов и процессов их обработки на этом уровне информационной зрелости УГАТУ целесообразно использовать IT-технологии BlockChain [15].

The image consists of two screenshots. The top screenshot shows a web browser with two tabs: 'Официальный сайт УГАТУ' and 'УГАТУ Личный кабинет'. The address bar shows 'https://lk.ugatu.su/'. Below the browser is a table with the following data:

Дата	Время	Дисциплина	Вид занятия	Группа	Раздаточный материал
17 марта 2020 г.	3 (12:10 - 13:45)	АИС в производстве	Лекция	ПИ-317	Рекомендации для дистанционного самообучения Для лекций на 7,8,9 учебн. нед.)
18 марта 2020 г.	3 (12:10 - 13:45)	Предметно-ориентированные автоматизированные информационные системы	Лекция	СТС-208	Лекция Поиск
18 марта 2020 г.	3 (12:10 - 13:45)	Предметно-ориентированные автоматизированные информационные системы	Лекция	ЭАС-210	Лекция Поиск
20 марта 2020 г.	2 (9:45 - 11:20)	Предметно-ориентированные автоматизированные информационные системы	Практика (семинар)	СТС-208	Поисковые Сервера (GOOGLE, Яндекс, Рамблер и др.)

The bottom screenshot shows a Moodle forum page titled 'АИС в производстве'. The breadcrumb trail is: 'В начало > Мои курсы > АИС в производстве > Новостной форум > АИС в производстве гр. ПИ- 317(для лекций на 7,8,9...'. The forum post is titled 'АИС в производстве гр. ПИ- 317(для лекций на 7,8,9 учебн. нед.) - 17.03.2020' and is by 'Геннадий Григорьевич Куликов'. The post content includes: 'Рекомендации для дистанционного освоения лекционного материала приведены в приложении' and a link to 'Материалы АИС в производстве гр. ПИ- 317.docx'.

Рис. 3. Фрагмент атрибутивной модели расписания преподавателя в IT-ландшафте информационной среды университета и каф. АСУ

Fig. 3. Fragment of the attributive model of the teacher's schedule in the IT-landscape of the information environment of the university and the department of automated control systems

Выводы

1. Определены необходимые условия для формализованного представления теоретико-множественных (атрибутивных) моделей временных ресурсов, их формальной идентифицируемости и прослеживаемости в автоматизированном режиме учебного процесса.

2. Реализован пример системного моделирования (системного описания ПОО) ряда учебных процессов, связанных временным ресурсом (расписанием) из условия формализованной идентифицируемости и прослеживаемости их в атрибутивной модели ПОО.

3. Приведён пример интеллектуализированной системной модели, реализованной в форме цифровой программной аналитической платформы в информационном пространстве, электронных документов функциональных подразделений учебного заведения.

Литература

1. Как определить уровень ИТ-зрелости своей компании – и какие они бывают. Блог компании КРОК, Системное администрирование, ИТ-инфраструктура. – <https://habr.com/ru/company/croc/blog/308010>.

2. Эффективное управление организационными и производственными структурами: монография / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др.; под ред. О.В. Логиновского. – М.: ИНФРА-М, 2020. – 450 с.

3. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: монография / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 410 с.

4. Логиновский, О.В. Управление современным вузом на базе развитой информационной системы: монография / О.В. Логиновский, В.Н. Любицын, М.И. Нестеров; под ред. доктора технических наук, профессора А.Л. Шестакова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013 – 539 с.

5. Суворова, В.А. Система поддержки принятия решений при планировании и управлении ресурсами учебного процесса: дис. ... канд. техн. наук / В.А. Суворова. – Уфа, 2010. – 158 с.

6. Танасенко, К.И. Системный подход к управлению учебным процессом в вузе / К.И. Танасенко // Гуманитарная информатика. – 2016. – № 11. – С. 53–59.

7. Куликов, Г.Г. Автоматизированное проектирование информационно-управляющих систем. Системное моделирование предметной области: учебное пособие / Г.Г. Куликов, А.Н. Набатов, А.В. Речкалов; УГАТУ. – Уфа: УГАТУ, 1998. – 104 с.

8. Куликов, Г.Г. Метод предметно-ориентированной классификации и системного моделирования слабо формализованных информационных потоков в системах автоматизации производства / В.В. Антонов, Д.В. Антонов, Ф.Ф. Шингарев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 116–130.

9. Куликов, Г.Г. Теоретические и прикладные аспекты построения моделей информационных систем / Г.Г. Куликов, В.В. Антонов, Д.В. Антонов. – LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Germany, 2011. – 134 с.

10. Системная модель автоматизации управления кафедрой на основе квалитетических показателей: монография / Г.Г. Куликов, К.А. Конев, В.А. Суворова, Г.В. Старцев // Уфа: УГАТУ, 2014. – 160 с.

11. Куликов, Г.Г. Комплексная организационно-функциональная модель планирования временных ресурсов учебного процесса для цифровой программно-аналитической платформы в информационном пространстве электронных документов / Г.Г. Куликов, В.А. Суворова, А.К. Хисаметдинова // Международная конференция по проблемам информатики. – Пенза. – С. 170–174.

12. Формирование и применение системной модели учебного процесса образовательного учреждения / Г.Г. Куликов, К.А. Конев, А.М. Сулейманова и др. // Вестник УГАТУ. – 2006. – Т. 8, № 2. – С. 43–47.

13. Хисаметдинова, А.К. Системная модель автоматизации мониторинга проведения занятий в вузе / А.К. Хисаметдинова; Пермск. нац. исследоват. политехн. ун-т // Молодежная наука в развитии регионов: материалы всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых. – Березники, 2020. – С. 39–42.

14. 1С: Автоматизированное составление расписания. Университет [Электронный ресурс]. – URL: https://solutions.1c.ru/catalog/asp_univer/features.

15. Выбираем блокчейн для своего бизнес-проекта: какое решение наиболее целесообразно. – https://zen.yandex.ru/media/id/5c4d6e91f6778500aeceba28/vybiraem-blokchein-dlia-svoego-biznes-proekta-kakoe-reshenie-naibolee-celesoobrazno-5e0315ca1febd400b0d0dbbf?utm_source=serp. – 26 декабря 2019.

Краткие сообщения

Куликов Геннадий Григорьевич, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; gennadyg_98@Yahoo.com.

Суворова Вероника Александровна, канд. техн. наук, доцент кафедры АСУ, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; ugatu_asu@mail.ru.

Шилина Мария Анатольевна, канд. техн. наук, доцент кафедры АСУ, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; ugatu_asu@mail.ru.

Хисаметдинова Айгуль Камиловна, аспирант, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; ag.kamilovna@gmail.com.

Поступила в редакцию 15 июня 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr200317

A SYSTEMATIC APPROACH TO INFORMATION MODELING THE INTELLECTUAL MANAGEMENT OF TIME RESOURCES IN THE SUBJECT ORIENTED FIELD (FOR EXAMPLE, CONTROL OF THE TIMETABLE OF THE UNIVERSITY)

G.G. Kulikov, gennadyg_98@Yahoo.com,

V.A. Suvorova, ugatu_asu@mail.ru,

M.A. Shilina, ugatu_asu@mail.ru,

A.K. Khisametdinova, ag.kamilovna@gmail.com

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

Introduction. The paradigm of digital transformation of resource management in production systems is based on the intellectual integration of virtual and real processes with production objects (their attribute models). In this case, the platform (environment) for intellectual integration of virtual and real processes is the information environment of the subject-oriented domain. The functions of specialists (in this case) are reduced to the role of experts who implement the formal predicate knowledge prescribed in the relevant methods and job descriptions (documents). This ensures the properties of identifiability, traceability, and repeatability (complete rollback) of processes. Time resource is the most important factor in the organization of management of subject-oriented areas (VET). Automation of the organization's processes, planning and monitoring of time resources in real and virtual aspects is an important and urgent task. A schedule is one of the main components of organizing any process. It should be noted that the scheduling process is quite time-consuming and objective.

Purpose of research. Consider a system model (system description) of the transformation of the schedule management process using a digital information platform that meets the requirements of the 4th level of maturity, allowing to solve current problems in a given aspect in VET. Develop a methodology for implementing this system model. Research methods used in the work: principles of system engineering methodology (process approach, life cycle, etc.); integrated approach and structural analysis of the design process using the SADT methodology (Structured analysis and Design Technology); functional modeling (in IDEFO notation).

Results. A method of system modeling (system description of VET) of processes associated with time resources is proposed from the condition of formalized identifiability and traceability in the attribute model of VET. Using the example of UGATU, it is shown that this intellectualized system model (system description of VET) can be implemented in the form of a digital software analytical platform in the information space of the functional divisions of the educational institution specified in the description of electronic documents.

Conclusion. The developed approach of system functional modeling based on a digital platform that meets the requirements of the 4th level of maturity allows solving actual problems of intellectualized management in a subject-oriented area.

Keywords: system modeling (system description), subject-oriented area of the University, time resources, information system (platform) of the University, class schedule.

References

1. *Kak opredelit' uroven' IT-zrelosti svoey kompanii – i kakiye oni byvayut. Blog kompanii KROK, Sistemnoye administrirovaniye, IT-infrastruktura* [How to Determine the Level of it Maturity of the Company – and what they are. CROC Company Blog, System Administration, IT Infrastructure]. Available at: <https://habr.com/ru/company/croc/blog/308010/> (accessed 20.05.2020).
2. Loginovskiy O.V., Gollai A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *Effektivnoe upravlenie organizatsionnymi i proizvodstvennymi strukturami* [Effective Management of Organizational and Production Structures: Monograph]. Moscow, INFRA-M, 2020. 450 p.
3. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N., Burkova I.V. Gelrud Ya.D., Korennaya K.A., Shestakov A.L. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy: monografiya* [Management of Industrial Enterprises: Strategies, Mechanisms, Systems: Monograph]. Moscow, INFRA-M, 2018. 410 p.
4. Loginovskiy O.V., Lyubitsyn V.N., Nesterov M.I. *Upravleniye sovremennym vuzom na baze razvitoy informatsionnoy sistemy* [Management of a Modern University Based on a Developed Information System]. Chelyabinsk, South Ural State University Publishing Center, 2013. 539 p.
5. Suvorova V.A. *Sistema podderzhki prinyatiya resheniy pri planirovanii i upravlenii resursami uchebnogo protsessa*. Dis. kand. tekhn. nauk [System of Decision Support in Planning and Managing Educational Process Resources. Cand. sci. diss.]. Ufa, 2010. 158 p.
6. Tanasenko K.I. [System Approach to the Management of Educational Processes in Higher Education]. *Humanities Informatics*, 2016, no. 11, , pp. 53–59. (in Russ.)
7. Kulikov G.G., Nabatov A.N., Rechkalov A.V. *Avtomatizirovannoye proyektirovaniye informatsionno-upravlyayushchikh sistem. Sistemnoye modelirovaniye predmetnoy oblasti* [Computer-Aided Design of Information and Control Systems. System Modeling of the Subject Area]. Ufa, UGATU, 1998, 104 p.
8. Kulikov G.G., Antonov V.V., Antonov D.V., Shingareev F.F. [Method of Subject-Oriented Classification and System Modeling of Weakly Formalized Information Flows in Production Automation Systems]. *Bulletin of the South Ural state University. Series: Computer technologies, management, radio electronics*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 116–130. (in Russ.)
9. Kulikov G.G., Antonov V.V., Antonov D.V. *Teoreticheskiye i prikladnyye aspekty postroyeniya modeley informatsionnykh sistem* [Theoretical and Applied Aspects of Building Models of Information Systems]. Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH& Co.KG, 2011. 134 p.
10. Kulikov G.G., Konev K.A., Suvorova V.A., Startsev G.V. *Sistemnaya model' avtomatizatsii upravleniya kafedroy na osnove kvalimetricheskikh pokazateley* [System Model of Automation of Department Management Based on Qualimetric Indicators]. Ufa, UGATU, 2014. 160 p.
11. Kulikov G.G., Suvorova V.A., Khisametdinova A.K. [Complex Organizational and Functional Model of Planning Time Resources of the Educational Process for a Digital Software and Analytical Platform in the Information Space of Electronic Documents. *Mezhdunarodnaya konferentsiya po problemam informatiki. Penza* [International conference on computer science.], 2019, Penza, pp. 170–174. (in Russ.)
12. Kulikov G.G., Konev K.A., Suleymanov M.A., Startsev G.V., Suvorova V.A. [The Formation and Application of a Systemic Model of the Educational Process of Educational Institutions. *Vestnik USATU*, 2006, vol. 8, no. 2, pp. 43–47. (in Russ.)
13. Khisametdinov A.K. [System Automation Monitoring Teaching in Higher Education]. *Molodezhnaya nauka v razvitiy regionov: Materialy vsereossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i molodykh uchennykh* [Youth Science in Regional Development: Materials of all-Russian Scientific-Practical Conference of Students and Young Scientists. Berezniki, Perms. NAT. rese. Polytech. UN-t-Berezniki, 2020, pp. 39–42. (in Russ.)
14. *IS: Avtomatizirovannoye sostavleniye raspisaniya. Universitet* [1C: Automated Scheduling University]. Available at: https://solutions.1c.ru/catalog/asp_univer/features/ (accessed 20.05.2020).

Краткие сообщения

15. *Vybirayem blokcheyn dlya svoeyego biznes-proyekt: kakoye resheniye naiboleye tselesoobrazno* [Choosing a Blockchain for your Business Project: which Solution is most Appropriate]. Available at: https://zen.yandex.ru/media/id/5c4d6e91f6778500aeceba28/vybiraem-blokchein-dlia-svoego-biznesproekta-kakoe-reshenie-naibolee-celesoobrazno-5e0315ca1febd400b0d0dbbf?utm_source=serp (accessed 20.05.2020).

Received 15 June 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Системный подход к информационному моделированию интеллектуального управления временными ресурсами в предметно-ориентированной области (на примере управления расписанием занятий университета) / Г.Г. Куликов, В.А. Суворова, М.А. Шилина, А.К. Хисаметдинова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 146–154. DOI: 10.14529/ctcr200317

FOR CITATION

Kulikov G.G., Suvorova V.A., Shilina M.A., Khisametdinova A.K. A Systematic Approach to Information Modeling the Intellectual Management of Time Resources in the Subject Oriented Field (for Example, Control of the Timetable of the University). *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 146–154. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200317

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.** Статья содержит УДК, название (не более 12–15 слов), список авторов, аннотацию (200–250 слов), список ключевых слов, введение, основной текст (структурированный по разделам), заключение (обсуждение результатов), литературу (в порядке цитирования, по ГОСТ 7.1–2003). В конце статьи следуют элементы на английском языке: название, аннотация, список ключевых слов, литература (references). Бумажная версия статьи подписывается всеми авторами.

3. **Параметры набора.** Размеры полей: левое – 3 см, правое – 3 см, верхнее и нижнее – по 3 см. Текст статьи набирать шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Выравнивание абзацев – по ширине. Отступ первой строки абзаца – 0,7 см. Междустрочный интервал – полуторный. Включить режим автоматического переноса слов. Все кавычки должны быть угловыми («»). Все символы «тире» должны быть среднего размера («–»), а не «-»). Ключевые элементы статьи – шапка, заголовки разделов – следует выделять полужирным. Знак деления целой и десятичной части числа – запятая. Между числом и единицей измерения должен стоять неразрывный пробел (Ctrl + Shift + Пробел).

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 к.х.н., доц. Голлаю А.В. Адрес электронной почты ответственного секретаря журнала: gollaiav@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. Шестаков Александр Леонидович.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-57366 выдано 24 марта 2014 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства 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: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки); 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки); 05.13.10 – Управление в социальных и экономических 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»
2020. Том 20, № 3

16+

Редактор *С.И. Уварова*
Компьютерная верстка *Н.Н. Егорьевой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 27.07.2020. Дата выхода в свет 03.08.2020. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 18,13. Тираж 500 экз. Заказ 219/220. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.