

ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2020
Т. 20, № 4

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

СЕРИЯ

«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

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

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

Основной целью издания является пропаганда научных исследований в следующих областях:

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

Редакционная коллегия:

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., д.т.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. 4

SERIES

“COMPUTER TECHNOLOGIES,
AUTOMATIC CONTROL,
RADIO ELECTRONICS”

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

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

South Ural State University

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

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

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

Editorial Board:

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;
Loginoskiy 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., Dr. 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. Krasovsky 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

МАЛИНА О.В., МОИСЕЕВ А.С., МАЛИНА Е.А. Классификатор области знаний как информационная модель системы структурного синтеза. Проблемы его создания и расширения	5
ШИНКАРЕВ А.А. Ретроспектива развития веб-технологий в создании корпоративных информационных систем	14

Управление в технических системах

KNADANOVICH D.V., SHIRYAEV V.I. Adaptive Guaranteed Estimation of a Constant Signal under Uncertainty of Measurement Errors	22
КАРАКУЛОВ И.В., КЛЮЕВ А.В., СТОЛБОВ В.Ю. Прогнозирование технического состояния электроцентробежного насоса на основе нейросетевого моделирования	37
ZATONSKIY A.V., YAZEV P.A. Development of a Mining Simulation Model for Potassium Ore Mining Planning	47

Инфокоммуникационные технологии и системы

SAIDOV B.B., TELEZHKIN V.F. Opto-Ultrasonic Communication Channels	55
БУРКОВ В.Н., БУРКОВА И.В., ЩЕПКИН А.В. Метод синтеза системы комплексного оценивания	63

Управление в социально-экономических системах

ДРАНКО О.И. О прогнозировании финансирования конверсии предприятий	74
БОНДАРЕНКО Ю.В., АЗИЗ АММАР ИМАД, ВАСИЛЬЧИКОВА Е.В., БОНДАРЕНКО О.В. Модели и алгоритмы согласованного распределения финансов при реализации проектов объединения хозяйствующих субъектов	83
ЛОГИНОВСКИЙ О.В., ГИЛЁВ Д.В. Использование математических методов диагностики как фактор эффективного управления медицинской организацией	95

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

ТУГАШОВА Л.Г., ЗАТОНСКИЙ А.В. Разработка системы автоматического регулирования флегмового числа ректификационной колонны	104
КУЛИКОВ Г.Г., РЕЧКАЛОВ А.В., АРТЮХОВ А.В. Методология системного моделирования адаптивного управления машиностроительным производством	115

Краткие сообщения

БОЛОДУРИНА И.П., ИВАНОВА (ЛУГОВСКОВА) Ю.П., АНЦИФЕРОВА Л.М., БЛИНОВ В.Д. Разработка модифицированного метода Winnowing для агрегирования данных библиографической информации из систем цитирования в условиях неполной информации	126
ЛОГИНОВСКИЙ О.В., ХАЛДИН А.С., ШИНКАРЕВ А.А. Влияние органов государственной власти субъектов РФ на развитие промышленных предприятий и корпораций	135
БОЛОДУРИНА И.П., ИВАНОВА (ЛУГОВСКОВА) Ю.П., АНЦИФЕРОВА Л.М. Оптимальное управление динамикой регуляции гликемии у больных сахарным диабетом первого типа	144

CONTENTS

Informatics and Computer Engineering

MALINA O.V., MOISEEV A.S., MALINA E.A. Classifier of the Knowledge Area as an Information Model of Structural Synthesis System. Problems of Its Creation and Development	5
SHINKAREV A.A. Retrospective of Web Technologies Evolution in Development of Enterprise Information Systems	14

Control in Technical Systems

KHADANOVICH D.V., SHIRYAEV V.I. Adaptive Guaranteed Estimation of a Constant Signal under Uncertainty of Measurement Errors	22
KARAKULOV I.V., KLUIEV A.V., STOLBOV V.Yu. Predicting the Technical Condition of an Electric Submersible Pump Based on Neural Network Modeling	37
ZATONSKIY A.V., YAZEV P.A. Development of a Mining Simulation Model for Potassium Ore Mining Planning	47

Infocommunication Technologies and Systems

SAIDOV B.B., TELEZHKIN V.F. Opto-Ultrasonic Communication Channels	55
BURKOV V.N., BURKOVA I.V., SHCHEPKIN A.V. Method of Synthesis of the Integrated Assessment System	63

Control in Social and Economic Systems

DRANKO O.I. Forecasting of Financing of Enterprise Conversion	74
BONDARENKO Yu.V., AZEEZ AMMAR EMAD, VASILCHIKOVA E.V., BONDARENKO O.V. Models and Algorithms of the Consistent Financial Distribution in the Implementation of Projects of the Association of Business Entities	83
LOGINOVSKIY O.V., GILEV D.V. The Use of Mathematical Methods of Diagnostics as a Factor of Effective Management of a Medical Organization	95

Automated Process Control Systems

TUGASHOVA L.G., ZATONSKIY A.V. Development of an Automatic Reflux Ratio Regulation System for the Rectification Column	104
KULIKOV G.G., RECHKALOV A.V., ARTYUKHOV A.V. Methodology of System Modeling of Adaptive Management of Machine-Building Production	115

Brief Reports

BOLODURINA I.P., IVANOVA (LUGOVSKOVA) Yu.P., ANTSIFEROVA L.M., BLINOV V.D. Development of a Modified Winnowing Method for Aggregating Bibliographic Information Data from Citation Systems under the Conditions of Incomplete Information	126
LOGINOVSKIY O.V., KHALDIN A.S., SHINKAREV A.A. The Influence of Public Authorities of the Constituent Entities of the Russian Federation on the Development of Industrial Enterprises and Corporations	135
BOLODURINA I.P., IVANOVA (LUGOVSKOVA) Yu.P., ANTSIFEROVA L.M. Optimal Control of Glycemia Regulation Dynamics in Patients with Type I Diabetes Mellitus	144

КЛАССИФИКАТОР ОБЛАСТИ ЗНАНИЙ КАК ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА. ПРОБЛЕМЫ ЕГО СОЗДАНИЯ И РАСШИРЕНИЯ

О.В. Малина, А.С. Мусеев, Е.А. Малина

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
г. Ижевск, Россия*

Цель. Использование принципиально новых подходов для решения задачи структурного синтеза слабо формализованных объектов – с одной стороны, вызов времени, требующий сокращения времени разработки и получения качественных технических решений, с другой стороны, результат исследований, позволяющих использовать инвариантные переборные алгоритмы для решения задачи структурного синтеза. Решение указанной задачи предлагаемым способом требует создания множества данных и знаний, перебор которого даст искомый результат. Формирование данного множества, поддержание его в корректном и актуальном состоянии – серьезная задача, требующая выработки новых подходов, формализации продиктованных этими подходами процессов и разработки алгоритмов. **Методы.** Этапами формирования указанного множества являются: сбор данных о существующих технических решениях, их формальное описание, обобщение этих описаний с формированием некоторой структуры, позволяющей однозначно идентифицировать каждый существующий объект и создавать новый путем комбинации имеющихся знаний или путем модернизации известных технических решений. В качестве структуры, обобщающей данные конкретной области знаний, предлагается использовать классификатор, особенностью которого является то, что при его организации реализованы два метода создания: иерархический и фасетный. Создание такого классификатора и поддержание его в корректном состоянии – задача, позволяющая решить проблему формирования информационного обеспечения систем структурного синтеза слабо формализованных объектов средней и высокой степени сложности. **Результаты.** Процесс создания такого классификатора сталкивается с рядом проблем, выявление которых – первый шаг в направлении разработки качественного информационного обеспечения. Указанные проблемы возникают на каждом из этапов анализа предметной области (анализ существующих вариантов исполнения объектов; обобщение знаний о рассмотренных объектах; дополнение (расширение) классификатора). Причинами их возникновения могут стать нарушение принципа достаточности при анализе и декомпозиции, нарушение иерархичности структуры при обобщении в процессе построения модели предметной области, нарушение признаков обязательности и необязательности при синтезе и расширении модели, основу которой составляет классификатор. **Заключение.** Выявление указанных проблем и исследования процесса их недопущения и преодоления – важная задача, решение которой позволит максимально формализовать процесс создания классификатора как информационной модели системы структурного синтеза.

Ключевые слова: классификация, классификатор, обобщенная модель, принцип достаточности, принцип эмерджентности, свойство «обязательности».

Введение

Автоматизация процессов создания новых объектов, будь то конструкции изделий машиностроения, программные комплексы или технические системы, является актуальной задачей, поскольку именно автоматизация позволяет существенно ускорить процесс разработки, получить структуры с учетом обобщенного профессионального опыта в сфере деятельности, максимально сократить вероятность появления ошибок, ставших следствием влияния человеческого фактора.

Уровень процесса автоматизации проектирования объектов во многом определяется уровнем формализации процессов, описывающих конкретную предметную область, что в свою очередь напрямую зависит от сложности объекта проектирования.

Менее формализованным, а значит, и менее автоматизированным на сегодняшний день остается процесс структурного синтеза, в результате которого формируется объект, отвечающий набору критериев, накладываемых постановщиком задачи, как набор конкретных модулей, охарактеризованных набором параметров, однозначно идентифицирующих эти модули.

Задача структурного синтеза возникает не только при проектировании новых структур. Важным направлением применения структурного синтеза является процесс конфигурирования структуры при модернизации существующего изделия (замены узлов, деталей).

В данной статье речь пойдет о структурном синтезе объектов средней степени сложности, для которых не существует полная предметная (обеспеченная алгоритмами предметной области) формализация процесса создания.

1. Подход к разработке системы структурного синтеза

Согласно рассмотренным ранее классификационным факторам [1, 2], для изделий средней степени сложности, рассмотрению которых посвящена данная статья, в качестве базовой выбирается тип структуры автоматизированной системы, отвечающей следующим квалификационным признакам:

- по формулировке задачи проектирования – получение варианта конструкции, удовлетворяющей требованиям технического задания;
- по базовому подходу к получению заданной структуры – процессы выбора из множества;
- по определению базовой функции системы и роли технического задания в процессе автоматизированного проектирования – доопределение множества характеристик;
- по базовому алгоритму процесса синтеза – переборные алгоритмы.

Совокупность классификационных признаков, описанных выше, позволяет сформировать требования, выполнение которых станет этапами разработки указанной системы.

Итак, указанная система должна:

- формировать множество технических решений, отвечающих требованиям технического задания на основе переборных алгоритмов;
- предоставить потребителю возможность вариации требований технического задания в широких пределах (когда одна и та же характеристика может выступать или параметром – результатом проектирования, или критерием – исходным ограничением на процесс проектирования).

Сформулированные требования, предъявляемые к функционированию системы, требуют прежде всего создания множества характеристик, описывающих класс проектируемых объектов, на которых системой и будет осуществляться комбинаторный перебор.

2. Классификатор – основные понятия и история вопроса

Множество данных, характеризующих предметную область, было систематизировано и оформлено в виде классификатора.

Понятие «классификации» и «классификатора» используется в научной сфере достаточно часто [3–13], при этом варьируется смысл, вкладываемый в эти понятия, в зависимости от задач, в решении которых они используются.

В общем понимании «классификация» – это, с одной стороны, способ организации какого-либо массива данных с целью систематизации знаний о некоторой области или объекте, с другой – процесс указанной систематизации.

Целью классификации является установление определенной структуры порядка, нормативно-мерного упорядочения множества, которое разбивается на гетерономные (разнородные) друг по отношению к другу, но гомогенные (однородные) внутри себя по какому-либо признаку, отделенные друг от друга подмножества [14].

Однако понятие «классификация» не следует рассматривать как простое деление объектов на группы – классы. Для классификации свойственны следующие принципиальные особенности.

1. Классификация – это, как правило, система последовательных делений.
2. Деления на классы в рамках классификации осуществляется с точки зрения наличия или отсутствия у объектов некоторых признаков.

3. По месту объекта в системе классификации можно судить о его свойствах.

4. Результаты классификации могут быть представлены в виде некоторых упорядоченных структур, удобных для систематизации человеком знаний о предметной области.

Определившись с понятием «классификация», введем понятие «классификатор», которое будет отличаться от общепринятого. Как правило, под классификатором понимается систематизированный перечень наименований объектов, каждому из которых в соответствие дан уникальный код. Таким образом «классификатор» – это результат классификации.

Часто классификатором называют лицо, осуществляющее классификацию.

Однако в данных исследованиях, посвященных разработке систем структурного синтеза, классификатором будем называть инструмент, на основании которого можно реализовать классификацию так, чтобы в результате ее каждый объект предметной области получил свой уникальный код.

3. Требования к классификатору

Приведенное выше определение позволяет сформулировать требования, которые необходимо выполнить, чтобы классификатор мог выступать в качестве информационной базы процесса перебора в рамках структурного синтеза.

Первое требование можно сформулировать как соблюдение «принципа достаточности». Причем достаточность должна быть соблюдена как «сверху» – меньше нельзя, так и «снизу» – больше не стоит.

Достаточность «сверху» можно сформулировать так: количество классификационных признаков должно быть достаточным для того, чтобы каждый экземпляр объекта имел свой уникальный код, так что любые два различных по структуре объекта имеют отличные коды.

Достаточность «снизу» позволяет отсеять незначимые для проектировщика признаки – свойства объекта, ограничив тем самым количество признаков, участвующих в рассмотрении.

Второе требование при создании классификатора как информационного обеспечения системы структурного синтеза – это возможность реализации смешанной структуры. Как правило, выделяют два метода создания классификатора [15]: иерархический и фасетный.

Иерархический предполагает последовательное деление множества на подчиненные подмножества, основанием деления которого является классификационный признак, с формированием структуры типа «дерево».

Фасетная классификация позволяет рассматривать множество признаков, разбивающих одно и то же исходное множество объектов на различные подмножества, в зависимости от выбранного признака – фасета. Именно фасетный метод позволяет формировать код объекта.

Рассматривая в качестве объекта классификации изделия средней степени сложности, имеющего непростую внутреннюю структуру, логично выполнить анализ функционального устройства иерархическим методом, используя привычные в предметной области термины, например: «узлы», «подузлы», «сборки», «подсборки», «детали», «поверхности».

Все прочие классификационные особенности объектов (как то: материал, размер, вес, форма и т. д.) – результат фасетной классификации.

В результате такого подхода классификационный код объекта – это совокупность всех кодов всех элементов иерархического разложения.

Третье требование при разработке классификатора – это соблюдение «принципа эмерджентности», состоящего в недопущении появления в характеристиках объекта свойств, присущих его элементам.

Реализация данного принципа освободит информационную базу от дублирования данных (когда одно и то же свойство принадлежит и объекту, и его части и при описании дублируется).

Рассмотрев базовые требования, можно кратко представить основные методы формирования классификатора, предварительно определив его структуру.

4. Методы построения классификатора

Структурно классификатор представляет собой иерархически декомпозированное и упорядоченное множество всех структурных элементов рассматриваемого класса объектов, для каждого из которых сформировано необходимое и достаточное множество фасетов – классификационных признаков с известным набором значений.

В работах [16–19] рассмотрены основные методы создания классификатора, которые содержат следующие этапы.

1. Анализ существующих вариантов исполнения объектов.
2. Обобщение знаний о рассмотренных объектах.
3. Дополнение (расширение) классификатора.

5. Проблемы построения классификатора (особенности модели)

Анализ существующих вариантов исполнения для каждого варианта выполняется в два шага:
– иерархическое структурное разложение «сверху-вниз»;
– описание каждого структурного элемента «снизу-вверх» (для предотвращения нарушения принципа эмерджентности, когда характеристика компонента отнесена к целому).

Описание каждого структурного элемента выполняется посредством выявления всех значащих характеристик, состоящих из категории и значения, например, «цвет – красный», «форма – круглая», «количество подшипников – 2».

Проблемными зонами этапа анализа существующих вариантов исполнения объектов являются:

- необходимость выполнения принципа достаточности;
- необходимость преодоления нарушения иерархической структуры при разложении, когда некоторый элемент имеет две материнские вершины (выходной вал первой ступени двухступенчатого редуктора является входным валом второй ступени двухступенчатого редуктора).

Этап обобщения – это этап формирования классификатора, когда четко установлены связи между элементами, разложенными иерархическим методом, а множество характеристик преобразовано в множество фасетов.

Корректность выполнения данного этапа – неперемное условие возможности использования полученного классификатора как модели синтеза.

Проблемы данного этапа обусловлены необязательностью отдельных элементов, составляющих иерархический скелет классификатора.

Следствием указанной проблемы является несоответствие количества функциональных элементов, составляющих скелет классификатора, количеству элементов конкретной реализации объекта, при этом мощность кода (количество признаков, характеризующих объект) одинакова для всех объектов данного класса.

Устранение указанной проблемы реализуется за счет дополнения в множества признаков необязательных вершин пустых значений – NIL – «не имеет значения».

6. Необходимость расширения классификатора

Дополнение классификатора – это очень важный и трудоемкий процесс. Дополнение классификатора в отличие от первых двух этапов может выполняться многократно по мере появления новых знаний об объектах рассматриваемого класса.

Первый раз дополнение классификатора происходит при первоначальном формировании модели.

Исходное множество рассматриваемых объектов (первоначальная выборка), на основе которых строится обобщенная модель, имеет, как правило, небольшую мощность (от 3 до 5). Этого бывает достаточно, чтобы сформировать первоначальный скелет обобщенной модели и определить базовое множество фасетов (признаков).

Однако для получения максимально полного представления о классе объектов происходит анализ полученной обобщенной модели, в рамках которого в процессе экспертного опроса происходит дополнение модели и расширение классификатора.

Расширение выполняется в несколько этапов.

На первом этапе эксперт анализирует скелет модели, в рамках которого он должен ответить на вопрос, все ли структурные элементы скелета, признанные обязательными на этапе обобщения, являются обязательными всегда. Преобразование обязательных функциональных вершин в необязательные может быть следствием особенностей структур, попавших в первоначальную выборку. Так, например, при создании модели класса спироидных редукторов в первоначальной выборке рассматривались только редукторы, в узле колеса которых три опоры. В результате обобщения все три опоры будут признаны обязательными функциональными вершинами. Однако

эксперт справедливо отметит, что существуют конструкции спироидного редуктора, в которых узел колеса имеет только две опоры. В результате этого третья опора колеса будет признана необязательной. Необязательность опоры повлечет ряд дополнений классификатора: во-первых, в множестве значений всех признаков подграфа модели, корневой вершиной которого является вершина «третья опора», должно появиться значение NIL; во-вторых, у функциональной вершины «узел колеса» появится признак «количество опор», значениями которого будут «две» и «три».

На втором этапе эксперт анализирует множество значений количественных признаков. Например, у вершины «узел червяка» в обобщенной модели сформировался признак «количество опор» со значениями «одна» и «две». Анализ позволит эксперту добавить в указанный фасет еще одно значение «три», поскольку бывают трехопорные исполнения узла червяка. Появление указанного значения говорит о том, что в скелете обобщенной модели узла червяка должна появиться вершина «третья опора», а вместе с ней подграф, представляющий ее структуру, включающий скелет и множество признаков.

На третьем этапе эксперт анализирует остальные признаки на предмет фиксации дополнительных значений, которые не присутствовали в структурах первоначальной выборки. Появление новых значений может также привести к дальнейшему расширению модели. Например, дополнение признака «способ соединения колеса с валом» значением «шпоночное соединение» предполагает дополнение модели функциональным элементом «шпонка» с соответствующим описанием.

Указанные выше дополнения не реализуются линейным процессом, поскольку выполнение одного может потребовать повторное выполнение другого, поэтому, в том числе, процесс первоначального дополнения модели – весьма трудоемкий и отнюдь не тривиальный.

Последующие дополнения или расширения классификатора осуществляются перманентно по мере появления новых знаний об объекте.

По мере накопления данных указанные выше процедуры дополнения могут существенно изменить классификатор области знаний, при этом базовым условием его использования становится его корректность, обеспечение которой в процессе расширения требует решения ряда проблем.

7. Проблемы расширения классификатора и пути их решения

Рассмотрим проблемы, которые возникают как в процессе создания обобщенной модели, так и в процессе ее дополнения.

Первая проблема – это нарушение принципа достаточности. В процессе создания и дополнения модели лица, ответственные за ее наполнение, должны четко ограничить область знаний, для которой формируется модель, круг задач, решаемых на базе указанной модели, и, как следствие, уровень детализации.

Очевидно, что не имеет смысла раскладывать на компоненты стандартные элементы. Так, в модели спироидных редукторов подшипник – сложный технический элемент – не раскладывается на составляющие компоненты и описывается лишь стандартным шифром.

Не имеет смысла вводить в модель признаки, несущественные для решаемых задач. Так, в модели спироидных редукторов не имеет смысла вводить признак «цвет корпуса», поскольку это для данного объекта абсолютно не имеет значения.

Очень важно, чтобы в качестве признаков классификатора присутствовали все требования, которые в виде критериев предъявляются к объектам данного класса потребителями, и все параметры, которыми оперируют разработчики в процессе создания объекта, отвечающего требованиям заказчика.

Вторая проблема – это нарушение принципа эмерджентности. Зачастую эксперту бывает не просто определить принадлежность той или иной характеристики структурному элементу.

Некорректное отнесение характеристики к элементу влечет за собой логические нарушения в процессе структурного синтеза.

Рассмотрим последствия ошибки, когда характеристика компонента была отнесена к его предку – материнской вершине.

Проблема возникнет тогда, когда с помощью указанного классификатора мы будем создавать не изделие в целом, а его отдельный компонент или решать задачу замены указанного компонента – модернизация структуры. В этом случае характеристика, отнесенная к другому элементу, выпадет из рассмотрения и процесс структурного синтеза даст некорректный результат.

Третья проблема – это нарушение свойства обязательности вершины. Это нарушение может быть двух видов: обязательной вершине случайно присвоили статус необязательной и наоборот.

Чуть ранее мы уже отмечали, что отдельные дополнения классификатора могут оказать существенное как непосредственное, так и опосредованное влияние на состояние модели в целом. Это касается в первую очередь набора вершин и изменения свойства «обязательности».

Исследование свойства обязательности вершин – это достаточно серьезное исследование, цель которого – разработать формальные правила, позволяющие на основании ограниченного набора экспертных оценок по изменению данных об отдельном элементе скорректировать модель в целом.

Четвертая проблема, которая уже упоминалась ранее, – это нарушение древовидности скелета классификатора. Данная проблема возникает, когда некий структурный элемент имеет двух родителей.

Для преодоления указанного логического нарушения в модель вводится понятие «вершина-фонтом», которая представляет ту же самую вершину, но в рамках иной структуры. Таким образом, один структурный элемент представлен в модели двумя вершинами.

При этом указанные вершины могут иметь разное свойство «обязательности» и даже разный набор описывающих их признаков. Так, например, при рассмотрении модели структуры редукторов очевидно, что выходной вал узла колеса первой ступени является входным валом узла червяка второй ступени.

Выходной вал первой ступени – элемент обязательный, поскольку в любом редукторе одна ступень есть всегда, а вот входной вал второй ступени в случае рассмотрения одноступенчатого редуктора может отсутствовать. Таким образом, элемент этот необязательный и, следовательно, все признаки, его характеризующие, должны иметь значение NIL.

Более того, в рамках первой ступени указанный вал характеризуется набором признаков, который может не совпадать с набором признаков, характеризующих его в рамках второй ступени.

Формализация решения проблемы нарушения свойства «обязательности» – серьезная задача, также требующая решения.

Заключение

Таким образом, выявив и рассмотрев указанные проблемы, можно выработать план создания формализованного подхода к разработке классификатора области знаний, позволяющего избежать логических ошибок при использовании его в качестве информационной модели системы структурного синтеза.

Литература

1. Малина, О.В. Классификационные факторы процесса структурного синтеза дискретных объектов / О.В. Малина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 132–138. DOI: 10.14529/ctcr190413
2. Malina, O.V. New Approach to Computer-Aided Design of Gearbox Systems: Models and Algorithms / O.V. Malina // New Approaches to Gear Design and Production. – 2020. – Vol. 81. – P. 427–438.
3. Микони, С.В. О классе, классификации и систематизации / С.В. Микони // Онтология проектирования. – 2016. – Т. 6, № 1. – С. 67–80.
4. Микони, С.В. Роль и место классификаций в системном анализе / С.В. Микони // Труды 4-й Международной конференции «Системный анализ и информационные технологии» (САИТ-2011), Абзаково, 17–23 авг., 2011. – Челябинск, 2011. – Т. 2. – С. 39–42.
5. Gilchrist, A. Research in information science / A. Gilchrist // Brit. Librarianship and Inf. Sci., 1966–1970. – 1972. – P. 320–341.
6. Arntz, H. Universality of classification? / H. Arntz // Univers. Cl. 2. Subject Anal. and Ordering Syst. Proc. 4 Int. Study Conf. Cl. Res., 6 Annu. Conf. Ges. Kl., Augsburg, 28 June – 2 July, 1982. – 1983. – Vol. 2. – P. 31–40.
7. Coates, E.J. Subject Searching of Large Scale Information Stores Embracing all Fields of Knowledge: Classification and Concept Matching / E.J. Coates // 6th Int. Study Conf. Classif. Res. “Knowledge Organ. Inf. Retrieval”, London, 16–18 June, 1997. – 1997. – No. 716. – P. 17–22.

8. Fox, R. *Cataloging our Information Architecture* / R. Fox // *OCLC Syst. and Serv.* – 2005. – Vol. 21, no. 1. – P. 23–29.
9. *Using Classification Schemes and Thesauri to Build an Organizational Taxonomy for Organizing Content and Aiding Navigation* / Z. Wang, A.S. Chaudhry, S. Christopher, G. Khoo // *J. Doc.* – 2008. – Vol. 64, no. 6. – P. 842–876.
10. Покровский, М.П. *Научные аспекты проблемы классификации* / М.П. Покровский // *Ежегодник-2007*. – Екатеринбург, 2008. – С. 395–401.
11. Mai, J.E. *The Modernity of Classification* / J.E. Mai // *J. Doc.* – 2011. – Vol. 67, no. 4. – P. 710–730.
12. Ryan, L.P. *Industry Classification Schemes* / L.P. Ryan, R. Ormsby // *J. Bus. and Finan. Librarianship*. – 2016. – Vol. 21, no. 1. – P. 1–25.
13. Pando, D.A. *Knowledge Organization in the Context of Postmodern from the Theory of Classification Perspective* / D.A. Pando, C.C. de Almeida // *Knowl. Organ.* – 2016. – Vol. 43, no. 2. – P. 113–117.
14. *Новейший философский словарь, 2009*. – http://dic.academic.ru/dic.nfs/dic_new_philosophy/ (дата обращения: 02.09.2020).
15. Еремин, Л.Н. *Классификация и кодирование как средства повышения эффективности информационных технологий* / Л.Н. Еремин. – http://www.fakit.ru/main_dsp.php?top_id=6196 (дата обращения: 02.09.2020).
16. Malina, O. *Problems of Developing the Model of Class of Objects in Intelligent CAD of Gear-box Systems* / O. Malina // *Advanced Gear Engineering Mechanisms and Machine Science*. – Springer, 2018. – Vol. 51. – P. 393–418. DOI: 10.1007/978-3-319-60399-5_19
17. Малина, О.В. *Обзор методов синтеза модели класса спироидных редукторов для интеллектуальных САПР. Часть 1. Графовый метод* / О.В. Малина // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2017. – № 2. – С. 43–52.
18. Малина, О.В. *Обзор методов синтеза модели класса спироидных редукторов для интеллектуальных САПР. Часть 2. Развитие методологии синтеза обобщенной модели* / О.В. Малина // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2017. – № 3. – С. 22–33.
19. Малина, О.В. *Подход к построению классификатора объектов машиностроения как основы информационного обеспечения САПР* / О.В. Малина, Э.Г. Зарифуллина, О.Ф. Валеев // *Научная дискуссия: вопросы технических наук: сб. ст. по материалам XVI междунар. заоч. науч.-практ. конф.* – М.: Изд-во «Международный центр науки и образования», 2013. – № 11 (13). – С. 111–120.

Малина Ольга Васильевна, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, г. Ижевск; malina_0705@mail.ru.

Моисеев Артем Сергеевич, аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, г. Ижевск; moiseyx86@yandex.ru.

Малина Елизавета Александровна, магистрант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, г. Ижевск; liza.06041234@mail.ru.

Поступила в редакцию 14 сентября 2020 г.

CLASSIFIER OF THE KNOWLEDGE AREA AS AN INFORMATION MODEL OF STRUCTURAL SYNTHESIS SYSTEM. PROBLEMS OF ITS CREATION AND DEVELOPMENT

O.V. Malina, malina_0705@mail.ru,
A.S. Moiseev, moiseyx86@yandex.ru,
E.A. Malina, liza.06041234@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

Goal. Application of fundamentally new approaches to solving the problem of structural synthesis of ill-defined objects is, on the one hand, a challenge of time that requires reducing the time for development and obtaining high-quality technical solutions, and, on the other hand, the result of research that allows the use of invariant trial and error algorithms for structural synthesis. Solving this problem by the proposed method requires the creation of the set of data and knowledge, the search of which will give the desired result. Formation of this set and control of its correct and actual state is a serious task requiring the development of new approaches, formalization of processes and development of algorithms imposed by these approaches. **Methods.** The stages of formation of the pointed set are: collection of data on existing technical solutions, their formal description, generalization of these descriptions with the formation of a certain structure, which allows for identifying each existing object unambiguously and creating a new one either by a combination of existing knowledge or by upgrading the known technical solutions. It is proposed to use a classifier as a structure that summarizes the data of a specific area of knowledge. The peculiarity of this classifier is that two methods of development are implemented here: hierarchical and faceted. Creation of such a classifier and its correct state is a problem that allows to solve the problem of formation of information support for structural synthesis systems of ill-defined objects of medium and high complexity. **Results.** The process of creating such a classifier deals with a number of problems, the identification of which is the first step towards the development of high-quality information support. These problems arise at each stage of the domain analysis (analysis of existing versions of objects; generalization of knowledge about the considered objects; addition (extension) of the classifier). The reasons for their occurrence may be violation of the principle of sufficiency in analysis and decomposition, violation of the hierarchy of the structure when generalizing in the process of building a domain model, violation of the signs of mandatory and optional when synthesizing and expanding the model, which is based on the classifier. **Conclusion.** Identifying these problems and studying the process of avoiding and overcoming them is an important task, the solution of which will allow you to formalize the process of creating a classifier as an information model of a structural synthesis system.

Keywords: classification, classifier, generalized model, sufficiency principle, emergence principle, "obligation" property.

References

1. Malina O.V. Classification Factors of the Process of Structural Synthesis of Discrete Objects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 132–138. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190413
2. Malina, O.V. New Approach to Computer-Aided Design of Gearbox Systems: Models and Algorithms. *New Approaches to Gear Design and Production*, 2020, vol. 81, pp. 427–438.
3. Mikoni S.V. [About Class, Classification and Systematization]. *Design Ontology*, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 67–80. (in Russ.)
4. Mikoni S.V. [The Role and Place of the Classifications in the System Analysis]. *Proceedings of the 4th International conference "System analysis and information technologies" (Chelyabinsk)*, 2011, vol. 2, pp. 39–42. (in Russ.)
5. Gilchrist A. Research in information science. *Brit. Librarianship and Inf. Sci.*, 1966–1970, 1972, pp. 320–341.
6. Arntz H. Universality of classification? *Univers. Cl. 2. Subject Anal. and Ordering Syst. Proc.*

4 *Int. Study Conf. Cl. Res., 6 Annu. Conf. Ges. Kl., Augsburg, 28 June – 2 July, 1982*, vol. 2., 1983, pp. 31–40.

7. Coates E.J. Subject Searching of Large Scale Information Stores Embracing all Fields of Knowledge: Classification and Concept Matching. *6th Int. Study Conf. Classif. Res. "Knowledge Organ. Inf. Retrieval", London, 16–18 June, 1997*, 1997, no. 716, pp. 17–22.

8. Fox R. Cataloging our Information Architecture. *OCLC Syst. and Serv.*, 2005, vol. 21, no. 1, pp. 23–29.

9. Wang Z., Chaudhry A.S., Christopher S., Khoo G. Using Classification Schemes and Thesauri to Build an Organizational Taxonomy for Organizing Content and Aiding Navigation. *J. Doc.*, 2008, vol. 64, no. 6, pp. 842–876.

10. Pokrovsky M.P. [Scientific Aspects of the Classification Problem]. *Yearbook*, 2007, 2008, pp. 395–401. (in Russ.)

11. Mai J.E. The Modernity of Classification. *J. Doc.*, 2011, vol. 67, no. 4, pp. 710–730.

12. Ryan L.P., Ormsby R. Industry Classification Schemes. *J. Bus. and Finan. Librarianship*, 2016, vol. 21, no. 1, pp. 1–25.

13. Pando D.A., De Almeida C.C. Knowledge Organization in the Context of Postmodern from the Theory of Classification Perspective. *Knowl. Organ.*, 2016, vol. 43, no. 2, pp. 113–117. DOI: 10.5771/0943-7444-2016-2-113

14. *Noveyshiyy filosofskiy slovar', 2009* [The Newest Philosophical Dictionary, 2009]. Available at: http://dic.academic.ru/dic.nfs/dic_new_philosophy/ (accessed 02.09.2020).

15. Eremin L.N. *Klassifikatsiya i kodirovaniye kak sredstva povysheniya effektivnosti informatsionnykh tekhnologiy* [Classification and Coding as a Means of Improving the Efficiency of Information Technologies]. Available at: http://www.fakit.ru/main_dsp.php?top_id=6196 (accessed 02.09.2020).

16. Malina O.V. Problems of Developing the Model of Class of Objects in Intelligent CAD of Gearbox Systems. *Advanced Gear Engineering. Mechanisms and Machine Science*, 2018, vol. 51, pp. 393–418. DOI: 10.1007/978-3-319-60399-5_19

17. Malina O.V. [Review of Methods for Synthesis of the Model of a Class of Spiroid Gearboxes for Intelligent CAD Systems. Part 1. Graph Method]. *Intelligent Systems in Production*, 2017, no. 2, pp. 43–52. (in Russ.)

18. Malina O.V. [Review of Methods for Synthesis of the Model of a Class of Spiroid Gearboxes for Intelligent CAD Systems. Part 2. Development of Methodology for Synthesis of the Generalized Model]. *Intelligent Systems in Production*, 2017, no. 3, pp. 22–33. (in Russ.)

19. Malina O.V., Zarifullina Je.G., Valeev O.F. [Approach to Development of the Classifier of Mechanical Engineering Objects as the Basis of Informational Support of CAD Systems]. *Nauchnaya diskussiya: voprosy tekhnicheskikh nauk: sb. st. po materialam XVI mezhdunar. zaoch. nauch.-prakt. konf.* [Scientific Discussion: Issues of Technical Sciences. Proceedings of the XVIth International Distance Scientific Practical Conference]. Moscow, "International Centre for Science and Education" Publ., 2013, no. 11 (13), pp. 111–120. (in Russ.)

Received 14 September 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Малина, О.В. Классификатор области знаний как информационная модель системы структурного синтеза. Проблемы его создания и расширения / О.В. Малина, А.С. Моисеев, Е.А. Малина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 5–13. DOI: 10.14529/ctcr200401

FOR CITATION

Malina O.V., Moiseev A.S., Malina E.A. Classifier of the Knowledge Area as an Information Model of Structural Synthesis System. Problems of Its Creation and Development. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 5–13. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200401

РЕТРОСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ ВЕБ-ТЕХНОЛОГИЙ В СОЗДАНИИ КОРПОРАТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А.А. Шинкарев

ООО «Софтмаст-ИТ», г. Челябинск, Россия

Введение. Первые упоминания о корпоративных информационных системах появились в 60-х гг. XX в. Со временем эти системы развивались, становились более сложными, но при этом позволяли решать широкий круг задач. Начиная с 90-х гг. XX в. стали активно развиваться веб-технологии. Естественным образом они нашли свое применение и при разработке корпоративных информационных систем различного назначения. **Цель исследования.** Описание основных этапов развития веб-технологий, начиная от появления языка гипертекстовой разметки до современных одностраничных веб-приложений, а также их влияния на подходы к созданию корпоративных информационных систем. Выявление перспективных направлений развития решений на базе веб-технологий, которые могут успешно использоваться при построении корпоративных информационных систем. **Материалы и методы.** Рассматриваются современные веб-технологии, анализируется процесс их развития от этапа появления до настоящего времени, рассматриваются примеры инструментов, которые были признаны устаревшими, и причины невозможности дальнейшего развития этих технологий. **Результаты.** В статье приводится история появления различных технологий, описывается их влияние на подходы к реализации корпоративных систем, а также приводится способ перехода от настольной версии системы к ее онлайн-версии. В том числе дается оценка перспективности отдельных технологических направлений, которые имеют хорошие шансы успешно развиваться в дальнейшем. Дается оценка растущей сложности веб-приложений, их сращивания с подходами и инструментами разработки серверной части. Выявляется актуальность разработчиков программного обеспечения, которые могут разрабатывать как серверную, так и клиентскую часть приложения.

Ключевые слова: веб-технологии, корпоративные информационные системы, браузер, веб-сервер, одностраничные приложения, JavaScript, ERP.

Введение

В течение последних десяти лет произошли значительные изменения в том, как мы создаем программное обеспечение. Этот эволюционный процесс затронул не только серверную часть с массовым переходом к использованию доступных облачных технологий и широким выбором технологий хранения данных, отличных от традиционных реляционных систем управления базами данных. Во многом изменился и подход к созданию пользовательских интерфейсов. Большой акцент сегодня сместился именно на веб-приложения. Они продолжают, как и прежде, использоваться для продвижения публичных интернет-ресурсов. Но что важнее, веб-приложения становятся одним из основных способов реализации решений куда более широкого спектра задач. Это и корпоративные сервисы, которые раньше в большей степени реализовывались через настольные приложения (Desktop Applications). Разработка мобильных приложений также во многом стремится использовать всю мощь современных браузеров. Даже те приложения, которые выглядят и устанавливаются как классические настольные приложения, на самом деле технически являются веб-приложениями, запущенными в браузере, лишенном классических элементов управления и навигации в сети Интернет. Примерами таких приложений сейчас являются Skype и Slack. Реализация приложений в виде веб-решений позволяет сделать их кроссплатформенными, то есть их можно запустить на любой из современных операционных систем, как и в основном в любом современном браузере.

1. Основные этапы развития веб-технологий

В начале 1990-х гг. Интернет существовал в виде протоколов, которые позволяли обмениваться сообщениями и письмами. Первый сайт (info.cern.ch) появился лишь в конце 1990 г. и со-

стоял полностью из текста. Так зародился HTML (HyperText Markup Language – язык гипертекстовой разметки), основы которого были описаны на этом сайте. HTML довольно быстро стал поддерживать 16 цветов и позволял вставлять изображения. Появление таких возможностей стало толчком к появлению первых браузеров – Mosaic (1993) и NetScape (1994) [1, 2].

В 1991 г. появилась первая спецификация протокола HTTP 0.9 (Hyper Text Transfer Protocol – протокол передачи гипертекста). С помощью этой версии протокола можно было выполнять только GET-запросы (простейшие запросы на чтение). При этом он не содержал никаких заголовков, поэтому с его помощью можно было передавать только HTML-страницы. В 1996 г. появилась версия HTTP 1.0, в которой была реализована поддержка заголовков и кода состояния, а также появилась возможность передавать разный формат документов. Все эти нововведения появились не одновременно, а постепенно в период с 1991 по 1995 г. С тех пор HTTP развивался и продолжает совершенствоваться по сей день. Он стал быстрее, надежнее и универсальнее [3, 4].

В 1991 г. Тим Бернерс-Ли разработал первый веб-сервер CERN-httpd. По мере развития HTML, HTTP и Интернета в целом появилась потребность в более быстром сервере. Им стал NCSA httpd. Немного позднее к развитию этого сервера подключились другие разработчики, которые добавляли новую функциональность и улучшения с исправлениями. В 1995 г. все изменения были объединены в новый сервер, известный как Apache. По развитию веб-серверов можно судить о том, что Интернет и веб-технологии эволюционировали и становились мощнее и удобнее. Благодаря этому стали доступны те возможности Web, которыми мы обладаем сейчас [5, 6].

Марк Андрессен, основатель Netscape Communications и член бывшей команды Mosaic, считал, что Интернету нужен способ стать более динамичным. Анимация, взаимодействие и другие формы небольшой автоматизации должны стать частью сети будущего. Поскольку на тот момент веб-технологии находились на том уровне, чтобы быть понятными «непрограммистам», то и технология, которая бы сделала страницы Интернета более динамичными, должна была стать доступной обычным пользователям, а не только разработчикам. Так был создан JavaScript, который сначала назывался Mocha. Для разработчиков планировалось использование очень популярного в то время языка Java, а точнее Java-апплетов, которые могли выполняться в браузере. В 1994 г. появилась первая версия JavaScript. В течение десятилетия наиболее популярным его использованием был код такого вида (Листинг 1), что наглядно показывает, насколько ограниченным было изначально предназначение языка JavaScript [7].

```
element.onClick = function() {  
    document.getElementById("myImage").src = "image.jpg";  
}
```

Листинг 1
Listing 1

Язык программирования JavaScript изначально не был разработан для создания сложного программного обеспечения. Это язык программирования с динамической типизацией, с синтаксисом, который прощает ошибки, неоднозначным механизмом наследования прототипа и отсутствующим понятием пакета или модуля. Все эти особенности первоначальных версий делают его более чем неоднозначным языком программирования, но именно ему посчастливилось оказаться в нужном браузере в нужное время для того, чтобы сегодня ему не было альтернатив. То, что начиналось как скриптовый язык для украшения HTML-страниц, сейчас используется обширнее, чем когда-либо. Несмотря на всю его распространенность, изначальные слабые стороны языка до сих пор позволяют писать код так, как этого делать не следует.

Помимо JavaScript в 1994 г. был создан язык программирования PHP в виде CGI-скриптов, написанный с помощью языка программирования C. Уже через год потребовалась большая функциональность, которая была реализована в PHP в 1995 г. Эта новая реализация была способна в том числе взаимодействовать с базами данных. Ее широкие возможности лежали в основе фреймворка, с помощью которого пользователи могли создавать простые динамические веб-приложения, такие как гостевые книги [8].

Для простых пользователей компания Microsoft выпустила HTML-редактор FrontPage. Среди непрофессионалов приложение получило огромную популярность: теперь любой человек в домашних условиях мог за несколько минут создать симпатичный сайт. При этом

FrontPage отлично взаимодействовал с Internet Explorer, что сделало его популярным в среде веб-разработчиков.

Веб-программы, напоминающие современные SPA-сайты (Single Page Application – одностраничные приложения), на самом деле существуют с середины 90-х. Это сайты, использующие Java-апплеты и Flash. Также интересным технологическим решением, появившимся в 2007 г., была технология Silverlight, позволявшая писать кроссплатформенный код на C#, запускаемый в браузере. Однако из-за запрета на запуск в браузере Safari данная технология уже в 2011 г. считалась отмирающей и после официального объявления о прекращении поддержки в 2015 г. стала активно выводиться из использования в программных продуктах [9].

Так называемые темные века веб-технологий продлились до 2005 г. В начале 2000-х гг. в браузерах стало использоваться малоизвестное API под названием XML HTTP Request (оно же XHR). Пример простейшего кода, позволяющий асинхронно загрузить и отобразить данные, приведен ниже (Листинг 2). Асинхронный JavaScript в сочетании с технологией XML появился в 2005 г.

```
var request = new XMLHttpRequest();
request.onload = function() {
    alert(this.responseText);
};
request.open('get', 'endpoint.php');
request.send();
```

Листинг 2
Listing 2

Рассмотрим основные вехи развития экосистемы веб-разработки в XXI в.

1. JSON (2001) – появление формата представления данных JavaScript Object Notation, который сейчас является самым популярным форматом, используемым для разработки интернет-решений. Сам формат основан на объектно-литеральном синтаксисе языка JavaScript.

2. JSLint (2002) – появление инструмента контроля качества программного кода, написанного на языке JavaScript. Эта библиотека является предком до сих пор популярной библиотеки JSHint.

3. JsMin (2003) – появление инструмента минификации программного кода, написанного на языке JavaScript. Минификация может значительно сокращать время, которое необходимо для загрузки ресурсов веб-сайта за счет сокращения размера итогового JavaScript-файла, что в свою очередь позволяет сайтам загружаться быстрее. В том числе в рамках агрессивной минификации производится так называемая аглификация (uglifyfication), становится значительно сложнее читать код и разбираться в нем.

4. jQuery (2006) – создание библиотеки, позволяющей писать кросс-браузерный код, расширяющей функциональность стандартной библиотеки языка JavaScript, а также добавляющей библиотеку базовых UI-компонентов.

5. JavaScript: Сильные стороны (2008) – издание книги, оказавшей значительное влияние на сообщество веб-разработчиков и на то, как они пишут программный код.

6. NodeJS (2009) – релиз платформы, позволяющей запускать программный код на языке JavaScript на сервере. С этого момента язык перестает существовать только в песочнице браузера и начинает распространяться и на бекенд-разработку и обрастать огромным количеством различных фреймворков и библиотек, которые на сегодняшний день покрывают почти любую необходимость при разработке корпоративных и публичных веб-решений.

2. Переход от статических веб-страниц к одностраничным приложениям

В начале 2000-х гг. и на более поздних этапах развития интернет-технологий произошло много событий. К тому времени веб-сайты нашли применение во многих сферах повседневной жизни. Информация приобрела большое значение. В основе большинства сайтов лежал статический HTML с использованием некоторых серверных технологий, история появления которых была описана ранее. С приходом в мир веб-технологий библиотеки jQuery в 2006 г. было положено начало развитию SPA-решений. Следует отметить, что в названии этой технологии используется слово «application», а не «website», что может свидетельствовать о том, что использование веба вышло на новый уровень.

Однако jQuery был ориентирован на пользовательский интерфейс и не подходил для обработки данных приложения. Следующим логичным шагом развития веб-приложений становится реализация библиотеки KnockoutJS, выпуск первой версии которой состоялся в 2010 г. Она реализовывала паттерн проектирования MVVM (Model-View-ViewModel) и позволяла связывать данные и их представление в пользовательском интерфейсе [10]. Тем не менее создание полноценного SPA еще представлялось маловозможным. Незадолго до KnockoutJS в 2009 г. была представлена библиотека Backbone.js, которая предлагала полноценную среду для разработки максимально приближенного к SPA приложения. В 2010 г. появилась первая версия AngularJS – фреймворка, объединившего лучшие подходы в создании SPA и позволившего реализовывать их в том виде, в котором мы их знаем сейчас. AngularJS реализовывал двустороннюю привязку данных, клиентский MVC, шаблоны и внедрение зависимостей в одном фреймворке [11].

В современной разработке клиентской части приложений широкое распространение получило применение упомянутого ранее паттерна проектирования MVVM, развивающего паттерн разработки MVC (Model View Controller) и возможно лучше подходящего для разработки пользовательских интерфейсов. В современных SPA-фреймворках присутствует двустороннее или одностороннее связывание данных (Data Binding). Для организации асинхронного взаимодействия используются промисы (Promises) или же реактивное программирование (Reactive Programming). Также инъекция зависимостей (Dependency Injection) является неотъемлемой частью архитектуры современных веб-решений.

На сегодняшний день кажется вполне вероятным дальнейшее усиление роли SPA-приложений на рынке разработки прикладного программного обеспечения. Этот инструмент успешно зарекомендовал себя как для создания публичных сайтов с высокими требованиями производительности и поддержки кодовой базы, так и для построения корпоративных веб-приложений с богатой доменной логикой, являющейся частью клиентского приложения, так называемых толстых клиентов. Помимо публичных и корпоративных систем SPA-решения находят свое применение и в создании мобильных и десктопных приложений, потому что позволяют писать логику на популярных у разработчиков кроссплатформенных технологиях, таких как HTML, CSS и JavaScript [12].

Сравнительно недавно появилась концепция под названием Micro Frontends, которая нашла в последнее время более серьезную поддержку на уровне официальных стандартов таких технологий, как Web Components [13]. Суть идеи заключается в том, чтобы дать возможность запускать в браузере для одного и того же приложения несколько разных фреймворков работы с деревом DOM (Document Object Model) через унифицированный интерфейс взаимодействия. Поддержка этого варианта взаимодействия уже присутствует во всех ведущих SPA-фреймворках. Эта поддержка будет только расширяться со временем. Идея разделить монолитную клиентскую логику веб-приложения по сути своей заимствует идеи микросервисной архитектуры, только применительно к клиентской стороне программного обеспечения. Естественно, идея разделения приложения на изолированные части, общающиеся между собой через унифицированный протокол, добавляет сложности процессам разработки и поддержки веб-приложений. Однако вариант полной изоляции может подойти крупным проектам, в разработку которых вовлечено несколько отдельных команд разработчиков. Этот шаг позволит сделать рост сложности программного обеспечения, который происходит с ростом объема функциональности, более линейным, а не экспоненциальным.

Стоит отметить, что подход с использованием технологии iframe [14], существующий по меркам веб-разработки очень давно, до сих пор может успешно использоваться для разбиения приложения с общим интерфейсом на части, обладающие изолированностью и независимостью развертывания. Кажется, что на данном этапе подход со встраиванием через iframe более предпочтителен по сравнению с вариантом использования не до конца зрелой технологии Micro Frontends [15].

Стоит отметить, что и направление внедрения кода, написанного не на JavaScript, имеет свое продолжение, в частности через технологию WebAssembly [16]. Например, ее использует Blazor, являющийся частью платформы .NET. Это также является интересным вариантом дальнейшего развития клиентских веб-приложений со сложной логикой, вынесенной за пределы серверной части.

Помимо технологий интеграции крупных модулей, которые были рассмотрены выше, важную роль играют системы реализации модульности на уровне кода отдельно взятого приложения. Для разбиения кода на модули и их встраивания в код использовались такие пакеты, как AMD, RequireJS, CommonJS. Распространение пакетов происходило с использованием таких сервисов, как NPM и Bower. Основными средствами автоматизации являлись Grunt и Gulp. Создание сложных программных продуктов, таких как, например, офисные пакеты работы с документами, уже во многом переходит в веб-формат. В частности, рабочая версия статьи набиралась в онлайн-версии Microsoft Word.

Во многом можно сказать, что разработка пользовательского интерфейса веб-решений становится все больше похожа на разработку серверной части за счет активного внедрения статической типизации с использованием таких библиотек, как TypeScript и Flow. Распространена тенденция, когда разработчики фронтенд-решений переходят к разработке бекенд-сервисов на платформе NodeJS, ведь вся экосистема им знакома. Также и бекенд-разработчики переходят к работе над логикой уровня представления, встречая все больше знакомых концепций, которые были у них позаимствованы. В целом кажется, что тенденция на смешение ответственности и переход к универсальному типу разработчика (Full-Stack Developer) только будет набирать обороты в дальнейшем.

3. Использование веб-технологий в построении корпоративных информационных систем

Развитие информационных технологий неизбежно привело к информатизации большей части процессов, протекающих в обществе и бизнесе. Все развивающиеся компании рано или поздно столкнулись с необходимостью систематизации и структурирования информации, а также с автоматизацией процессов обработки этой информации. На начальном уровне было возможно использование различных настольных приложений для работы с информацией, однако с увеличением ее объемов стало ясно, что необходимо создание корпоративных информационных систем. Корпоративная Информационная Система (КИС) – это масштабируемая система, предназначенная для комплексной автоматизации всех видов хозяйственной деятельности компаний, а также корпораций, требующих единого управления [17].

Рассмотрим этапы развития корпоративных информационных систем.

1. 1960-е гг.: появление MRP (Material Requirements Planning) – планирование потребности в материалах.

2. 1980-е гг.: появление MRP 2 (Manufactory Resource Planning) – планирование производственных ресурсов.

3. 1990-е гг.: появление ERP (Enterprise Resource Planning) – набор интегрированных приложений, позволяющих создать интегрированную информационную среду для автоматизации планирования, учета, контроля и анализа всех основных бизнес-операций предприятия.

4. 2000-е гг.: появление CSRP (Customer Synchronized Resources Planning) – планирование ресурсов, синхронизированное с покупателем [18].

Использование веб-технологий в построении корпоративных систем началось на этапе появления ERP. Поскольку информационные технологии активно развивались, то компании, занимающиеся разработкой КИС, понимали, что удобство использования систем будет намного выше, если взаимодействие с этими системами будет доступно по сети Интернет. Изначально это взаимодействие ограничивалось использованием HTML и XML. Архитектура таких систем включала в себя наличие сервера HTML-интерфейса, сервера XML-данных, сервера приложения, а также сервера СУБД (система управления базами данных). Сервера HTML и XML реализовывались на основе Apache или Netscape [19].

По мере развития HTTP, HTML, средств для создания пользовательских интерфейсов, способов хранения и обработки данных, а также увеличения объема этих данных зародилась идея реализации распределенных информационных систем. Первым шагом на пути к этому стало использование ASP (Application Service Provider). Технология ASP позволяла обеспечивать доступ к информационной системе, которая была установлена на стороннем сервере. Такой подход зародился по причине того, что КИС уже стоили больших денег, что делало невозможным их покупку предприятиями малого и среднего бизнеса. Кроме того, значительно выросла и сложность самих систем, что приводило к огромным расходам на распространение программного обеспечения

среди конечных пользователей. Доступ с использованием ASP предоставляла компания SAP к своему продукту SAP R/3 [20].

Традиционная структурная схема локальной информационной системы выглядит следующим образом.

1. Интерфейс пользователя.
2. Ядро системы.
3. Информационный массив.
4. Интерфейс администратора.
5. Утилиты администратора.

Переход от локальной информационной системы (ИС) к ее веб-версии возможен при реализации ее структурных элементов с использованием веб-технологий. С точки зрения веб-технологии интерфейс пользователя – это браузер, который взаимодействует с ядром через HTTP-сервер. Таким образом происходит первый этап декомпозиции традиционной ИС в веб.

Второй шаг – это возможность использования браузера в качестве интерфейса администратора. Здесь возникают вопросы разграничения доступа и актуализации информации в базах данных системы.

Следующий шаг – распределение нагрузки по нескольким серверам, а также использование кэширования на серверах-посредниках.

Пока декомпозиции подвергалась связка «конечный пользователь – ядро». Можно провести декомпозицию и на стороне сервера. Первым таким шагом является применение CGI при доступе к ресурсам. Сервер становится посредником между браузером и сервером ресурса. Более эффективно это решается за счет API (Application Programming Interface), когда сам HTTP-сервер имеет модуль доступа к серверному процессу.

Другим важным моментом является внедрение результатов обращения к внешнему ресурсу в готовые шаблоны страниц. В терминологии веб – это Server Site Include. Вставка может осуществляться как локально, так и с использованием данных удаленного сервера. Таким образом, сервер оснащается языком манипулирования данными при формировании отклика.

Другой инструмент – это видоизменение страниц на стороне клиента. Управление формой интерфейса пользователя осуществляется на стороне клиента при помощи скриптовых языков, таких как JavaScript. В первую очередь, это позволяет повысить интерактивность ИС, построенной на основе веб-технологий. Сейчас активно используется SPA-подход в организации пользовательского интерфейса.

Для поддержки сеанса работы с сервером в веб применяется спецификация Cookie. Идея состоит в том, чтобы передавать от клиента на сервер и обратно информацию о пользователе и его действиях, которая привязывается по типу информационного ресурса и времени [21]. Например, компания SAP предоставляет ERP, реализованную по схожему подходу.

Таким образом, использование веб-технологий при разработке КИС позволяет в любое время и любом месте:

- 1) посылать письменные сообщения;
- 2) представлять свое предприятие, свои товары и услуги, осуществлять обратную связь с клиентами (получать заказы, рекламации и т. д.);
- 3) заниматься маркетингом;
- 4) искать сотрудников;
- 5) устанавливать деловые связи, покупать товары и услуги;
- 6) производить прямые расчеты с покупателями и поставщиками.

Переход ИС из громоздких и сложных локальных приложений на сторону веб-технологий позволяет предприятиям малого и среднего бизнеса в полной мере использовать возможности, которые сегодня предоставляют информационные технологии, а значит, выйти на новый уровень эффективности ведения бизнеса.

Заключение

Развитие веб-технологий сыграло важную роль в подходах к созданию корпоративных информационных систем. Технологии создания веб-приложений прошли большой путь развития от простейших текстовых страниц до больших и сложных приложений, способных решать широкий круг бизнес-задач.

По мере развития корпоративных информационных систем от простых настольных приложений до крупных системных комплексов со сложной архитектурой их стоимость на рынке программного обеспечения также росла, росли затраты на распространение систем между конечными пользователями в организации. По этой причине предприятия малого и среднего бизнеса не могли позволить себе использование корпоративных информационных систем.

Поскольку в современном мире сложилась тенденция перехода различных систем в веб-пространство, а также тот факт, что веб-технологии достигли высокого уровня развития, закономерно, что стала возможна и реализация корпоративных информационных систем с использованием новейших веб-технологий. Это в свою очередь открывает новые пути развития таких систем и дает возможность их использовать малым и средним компаниям для достижения бизнес-целей. Доступность системы, требующей от пользователя лишь наличия браузера, 24 часа 7 дней в неделю в публичном пространстве, в значительной степени определила лидирующую роль веб-решений по сравнению с классическими настольными приложениями.

Решения, базирующиеся на SPA-фреймворках, имеют все шансы продолжить господствовать среди инструментов создания веб-приложений. Однако не стоит сбрасывать со счетов концепцию микрофронтендов, которая, возможно, нивелирует синтаксическую пропасть между лидирующими SPA-фреймворками сегодня. Также возможным направлением универсализации является развитие таких технологий, как рассмотренная технология WebAssembly, запуска в браузере кода, написанного не на языке программирования JavaScript.

Бесспорно одно – разработка клиентской части веб-приложений будет продолжать усложняться и экосистема технологий вокруг будет лишь расти, вместе с тем рождая новые альтернативы реализации той же функциональности, но используя разные языки, библиотеки и подходы к интеграции. Сложность этой части программного обеспечения во многом будет сравниваться с реализацией серверной части, а актуальность программистов-универсалов на рынке труда будет лишь усиливаться.

Литература/References

1. Wallace J. *HTML5 Quick Markup Reference*. 1st ed. Edition. New York, Apressm, 2016. 257 p.
2. Daubs M. *The SAGE International Encyclopedia of Mass Media and Society*. Los Angeles, SAGE Publications, 2019. 2168 p.
3. Grigorik I. *High Performance Browser Networking: What every web developer should know about networking and web performance*. Sebastopol, O'Reilly Media, 2013. 400 p.
4. Evolution of HTTP. Available at: https://developer.mozilla.org/ru/docs/Web/HTTP/Basics_of_HTTP/Evolution_of_HTTP (accessed 23.09.2020).
5. Berners-Lee T., Luotonen A. *CERN httpd Reference Manual*. Geneva, CERN, 1994.
6. Laurie B., Laurie P. *Apache: The Definitive Guide*. Sebastopol, O'Reilly Media, 2002. 536 p.
7. Peyrott S. It All Began in the 90s. *A Brief History of JavaScript*, 2017, pp. 2–6.
8. Lerdorf R., Tatroe K., MacIntyre P. *Programming PHP*. Sebastopol, O'Reilly Media, 2013. 528 p.
9. *Microsoft Silverlight*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Silverlight (accessed: 12.09.2020).
10. *Knockout (web framework)*. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Knockout_\(web_framework\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Knockout_(web_framework)) (accessed 14.09.2020).
11. *AngularJS*. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/AngularJS> (accessed 20.09.2020).
12. Mikowski M. *Single Page Web Applications: JavaScript end-to-end*. Shelter Island, Manning Publications, 2014. 432 p.
13. Web Components. Available at: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/Web_Components (accessed 20.09.2020).
14. <iframe>. The Inline Frame element. Available at: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTML/Element/iframe> (accessed: 22.09.2020).
15. Geers M. *Micro Frontends in Action Paperback*. Shelter Island, Manning Publications, 2020. 296 p.
16. WebAssembly. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/WebAssembly> (accessed: 24.09.2020).
17. Сатунина А.Е., Сысоева Л.А. Управление проектом корпоративной информационной системы предприятия. М.: Финансы и статистика: Инфра-М, 2009. 352 с. [Satunina A. E., Sysoeva L.A. *Upravleniye proyektom korporativnoy informatsionnoy sistemy predpriyatiya* [Project management of corporate information systems of the enterprise]. Moscow, Finansy i statistika, Infra-M, 2009. 352 p. (in Russ.)]

18. Тамъяров А.В. История развития и современные проблемы корпоративных информационных систем. Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2011. № 30. [Tam'yarov A.V. [History of development and modern problems of corporate information systems]. Vestnik of Volzhsky University after V.N. Tatischev, 2011, no. 30. (in Russ.)]

19. Majchrzak A., Traverso P., Monfort V. *Web Information Systems and Technologies: 14th International Conference*. New York, Springer, 2017. 274 p.

20. Kelly L., Thomas J. *Application Service Provider and Software as a Service Agreements Line by Line: A Detailed Look at ASP and SaaS Agreements and How to Change Them to Meet Your Needs*. Eagan, Aspatore Books, 2009. 108 p.

21. Vidgen R. *Developing Web Information Systems: From Strategy to Implementation*. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2002. 274 p.

Шинкарев Александр Андреевич, канд. техн. наук, инженер-программист, ООО «Софт-маст-ИТ», sania.kill@mail.ru.

Поступила в редакцию 9 октября 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr200402

RETROSPECTIVE OF WEB TECHNOLOGIES EVOLUTION IN DEVELOPMENT OF ENTERPRISE INFORMATION SYSTEMS

A.A. Shinkarev, sania.kill@mail.ru

Softmast-IT LLC, Chelyabinsk, Russian Federation

Introduction. The first mentions of enterprise information systems refer to the 1960s. These systems developed over time, becoming more complex and allowing to solve a wide range of problems. The 1990s mark the beginning of the active development of web technologies. Naturally, they found way into the development of enterprise information systems used for various purposes. **The purpose of the study** was to describe the main stages in the development of web technologies, from the appearance of the hypertext markup language to modern single-page web applications, as well as the impact they had on approaches to the development of enterprise information systems. The author meant to identify promising trends in web-based solutions that can be successfully used in the development of enterprise information systems. **Materials and methods.** The paper discusses modern web technologies, their development from the dawn to the present day, as well as some tools recognized as obsolete, and the reasons why it is impossible to develop them further. **Results.** The paper gives the history of the emergence of various technologies, describes their impact on approaches to the implementation of enterprise systems, and a way to move from a desktop version of the system to an online one. Some predictions are made concerning the prospects of certain technological areas that have good chances to successfully develop in the future. The author assesses the growing complexity of web applications, the way they merge with the server side development approaches and tools. The demand of software engineers who can develop both the server and client side of an application is rationalized.

Keywords: web technologies, enterprise information systems, browser, web server, single page application, JavaScript, ERP.

Received 9 October 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шинкарев, А.А. Ретроспектива развития веб-технологий в создании корпоративных информационных систем / А.А. Шинкарев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 14–21. DOI: 10.14529/ctcr200402

FOR CITATION

Shinkarev A.A. Retrospective of Web Technologies Evolution in Development of Enterprise Information Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 14–21. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200402

ADAPTIVE GUARANTEED ESTIMATION OF A CONSTANT SIGNAL UNDER UNCERTAINTY OF MEASUREMENT ERRORS

*D.V. Khadanovich, khadanovichdv@susu.ru,
V.I. Shiryayev, shiriaevvi@susu.ru*

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

In the guaranteed estimation problems under uncertainty relative to disturbances and measurement errors, the admissible sets of their possible values are determined. The solution is chosen due to conditions of guaranteed bounded estimates optimization corresponding to the worst realization of disturbances and measurement errors. The result of the guaranteed estimation is an unimprovable bounded estimate (information set), which turns to be overly pessimistic (reinsurance) if a prior admissible set of measurement errors is too large compared to their realized values. The admissible sets of disturbances and measurement errors can turn to be only rough upper estimates on a short observation interval. **The goal of research** is the accuracy enhancement problem of guaranteed estimation when measurement errors are not realized in the worst way, i.e. the environment in which the object operates does not behave as aggressively as it is built in a priori data on the permissible set of error values. **Research design.** The problem of adaptive guaranteed estimation of a constant signal from noisy measurements is considered. The adaptive filtering problem is, according to the results of measurement processing, from the whole set of possible realizations of errors, to choose the one that would generate the measurement sequence. **Results.** An adaptive guaranteed estimation algorithm is presented. The adaptive algorithm construction is based on a multi-alternative method based on the Kalman filter bank. The method uses a set of filters, each of which is tuned to a specific hypothesis about the measurement error model. Filter residuals are used to compute estimates of realized measurement errors. The choice of the realization of possible errors is performed using a function that has the meaning of the residual variance over a short time interval. **Conclusion.** The computational scheme of the adaptive algorithm, the numerical example, and comparative analysis of obtained estimates are presented.

Keywords: constant signal estimation, guaranteed estimation, adaptive algorithm, bounded estimate, measurement residual.

Introduction

The estimation problem of a constant signal x from noisy measurements is considered [1]

$$y_k = x + v_k, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

where $x \in R^1$ is a constant value (useful signal), $v_k \in R^1$ are the measurement errors. Under natural conditions, the values of measurement errors $v_k, k = \overline{1, N}$, are unknown (uncontrolled). A priori information about measurement errors is formalized by choosing a hypothesis about the properties of errors v_k . The following hypotheses are traditional.

1. The measurement errors v_k are random and given by probability density function with known parameters.
2. The measurement errors v_k are uncertain quantities: $v_k \in V$, where V is a given convex set of their possible values.

Acceptance of the hypothesis about the probabilistic nature of measurement errors makes it possible to formulate the problem within the framework of the stochastic approach as the problem of finding the optimal estimate in the mean square sense and to use statistical methods [2]. The most common is the use of the least-squares method (LS) [1, 2], i.e. minimizing a function

$$J(x) = \sum_{k=1}^N (y_k - x)^2, \quad \hat{x}^{LS} = \arg \min_x J(x).$$

Recurrent algorithms are most widely used in solving problems of processing noisy measurements when an estimate of an unknown quantity is formed by the sequential processing of each available measurement and the results obtained at the previous processing step. The recurrent LS-method is the relations of the Kalman filter (KF) for the considered problem (1) [3, 4]. However, any inaccuracy in the knowledge of the probabilistic characteristics of errors v_k can cause divergence of the filtering process [5–8].

However, in many situations, the application of stochastic estimation methods can be difficult: due to the small number of available measurements, based on the results of which the search for the best estimate is carried out, or the absence of probabilistic characteristics of measurement errors. Besides, the assumption about the random nature of measurement errors is not always justified [5, 8]: often it is only known that the measurement errors v_k are bounded.

Given a set of possible values of measurement errors, it is possible to formulate the problem within the guaranteed (set-membership approach) as the problem of finding the bounded set of possible values of an unknown quantity [9–26]. In this case, the problem solution is selected from the condition of the optimization of guaranteed bounded estimates corresponding to the worst realization of measurement errors [8, 12, 18, 24]. The advantage of guaranteed estimation methods is the absence of random filtering errors [10–15, 21, 23, 27]. However, the resulting bounded estimate (information set) may turn out to be overly pessimistic (reinsurance) if the set of possible values of measurement errors is too wide [8, 17, 18]. The problem of adaptive algorithm development for guaranteed estimating becomes relevant [28]. The adaptive guaranteed estimation problem is, according to the results of measurement processing, from the whole set of possible realizations of errors, to choose the one that would generate the sequence of measurements [8].

One of the central issues of modern estimation theory [29–32] is the synthesis of adaptive filters enabling of providing a sufficiently accurate estimate of the state vector in the absence of accurate a priori information about disturbances and measurement errors is one of the. In [6, 7, 29, 32], various algorithms for adaptive filtering of stochastic systems with unknown values of the noise covariance matrices are discussed.

This article is focused on the problem of adaptive guaranteed estimation of a constant signal from noisy measurements. The development of an adaptive estimation algorithm is based on a multi-alternative method based on a Kalman filter bank, which was first proposed in [33] for estimating random processes with unknown constant parameters [34, 35]. This method has found wide application in problems with a multi-alternative description of a system state or process [36–38]. The work continues research [39, 40].

Statement of the problem

Consider the estimation problem solution of unknown constant signal from a single realization of measurements (1) in the framework of a guaranteed (set-membership) approach. A priori information about the initial value x_0 of a variable and errors v_k is represented in the form of admissible sets of the corresponding quantities [9–12, 16–20, 24, 26]

$$x_0 \in X_0 = \left[_x_0, \ ^+x_0 \right], \quad v_k \in V = \left[_v, \ ^+v \right], \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

where $_x$, $\ ^+x$ are respectively left and right bounds of the set X_0 , $_v$, $\ ^+v$ are respectively left and right bounds of the set V .

The result of guaranteed estimation is the construction of the information set \bar{X}_k that is guaranteed to contain an unknown signal x [10–24].

$$x \in \bar{X}_k = \left[_x_k, \ ^+x_k \right], \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

The information set is defined as follows [18, 23]:

$$\bar{X}_k = \bar{X}_{k-1} \cap X[y_k], \quad \bar{X}_0 = X_0, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (4)$$

where $X[y_k]$ is the measurement consistent set

$$X[y_k] = \{x \mid x = y_k - v, v \in V\}, \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

The presence of the estimate \bar{X}_k (4) is fundamentally important from determining the consistency of a priori information (2) [23]. The algorithm efficiency mainly depends on a priori estimate V which is adequate to the realized errors v_k :

1. Errors in the set V definition, i.e. a failure of the assumptions (2) when $v_k \notin V$, can lead to the fact that the information set \bar{X}_k may be empty at some time step k : $\bar{X}_k = \emptyset$. Errors in set X_0 definition can also lead to such a situation.

2. If the set V is too wide, then the information set \bar{X}_k will regularly within the measurement consistent set $X[y_k]$: $\bar{X}_{k-1} \subset X[y_k]$, $\bar{X}_{k-1} = \bar{X}_k$. In this case, measurement processing is useless, i.e. it does not lead to an increase in the estimation accuracy – a decrease in estimation errors.

Consider an algorithm for solving the guaranteed estimation problem for the case, when a prior admissible set V is too wide, as a result $\bar{X}_{k-1} = \bar{X}_k$, $k = 1, 2, \dots$.

Adaptive algorithm of guaranteed estimation

By following the LS-method and the KF, consider the measurement residual formed as the difference between the measured value and the estimate obtained at the previous step [4, 8, 9]

$$\begin{aligned} \mu_k &= y_k - x_{k-1}^*, \quad x_{k-1}^* \in \bar{X}_{k-1} = \left[-x_{k-1}, +x_{k-1} \right], \\ x_{k-1}^* &= \left(-x_{k-1} + +x_{k-1} \right) / 2, \quad k = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (6)$$

Substituting the measurement equation (1) into this equation, we find that

$$\mu_k = e_k + v_k, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

where $e_k = x - x_{k-1}^*$ is the estimation error of unknown signal x .

Thus, the residual μ_k (7) corresponding to the current moment of time k is an estimate of the realized measurement error v_k , and the estimation error of the measurement error is equal to the estimation error of the signal x .

As for estimation error e_k , it is known that

$$e_k \in X_{k-1}^0 = \left[-x_{k-1}^0, +x_{k-1}^0 \right], \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (8)$$

where

$$X_{k-1}^0 = \bar{X}_{k-1} - x_{k-1}^*, \quad k = 1, 2, \dots, N,$$

is the centered set symmetric about zero, $0 \in X_{k-1}^0$.

The estimate (8) is guaranteed and means that the actual estimation error e_k can take any value from the set X_{k-1}^0 .

Taking into account the constraint (8) on the error value e_k , the permissible set of measurement errors v_k can be represented as

$$\begin{aligned} V_k &= \left\{ v \mid v = \mu_k - e, \forall e \in X_{k-1}^0 \right\} = \left\{ v \mid \mu_k - +x_{k-1}^0 \leq v \leq \mu_k - -x_{k-1}^0 \right\} = \\ &= \left[\mu_k - +x_{k-1}^0, \mu_k - -x_{k-1}^0 \right], \quad k = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (9)$$

In the equation for the measurement residual (6) substitute the estimate x_0^* given a priori for the estimate obtained at the previous time step x_{k-1}^*

$$\mu_k = y_k - x_0^* = e + v_k, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (10)$$

$$x_0^* \in X_0 = \left[-x_0, +x_0 \right], \quad x_0^* = \left(-x_0 + +x_0 \right) / 2. \quad (11)$$

The value

$$e = x - x_0^* \quad (12)$$

is the error of the initialization of x .

The centered set

$$e \in \left[-x_0 - x_0^*, \quad +x_0 - x_0^* \right] \quad (13)$$

is the set of possible values of errors e (12), symmetric about zero.

Taking into account equations (10) and conditions (11), (13), represent the admissible set of measurement errors in the form

$$\begin{aligned} v_k \in V_k &= \left\{ v \mid \mu_k - \left(+x_0 - x_0^* \right) \leq v \leq \mu_k - \left(-x_0 - x_0^* \right) \right\} = \\ &= \left[\mu_k - \left(+x_0 - x_0^* \right), \quad \mu_k - \left(-x_0 - x_0^* \right) \right], \quad k=1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (14)$$

Thus, the width of the permissible set V_k (14) of measurement errors v_k is determined by the width of the permissible set of errors e in setting information about the actual value x (13).

Explain this choice. As shown above, if the admissible set $V = \left[-v, \quad +v \right]$ of errors v_k is a priori given too wide, so that $X_0 \subset V$, then the information set \bar{X}_k is within the measurement consistent set: $\bar{X}_{k-1} \subset X[y_k]$ and $\bar{X}_{k-1} = \bar{X}_k$. According to the minimax principle, the estimation error $e_k = e = x - x_0^*$ (12) will be the minimum of the maximum possible (minimum in the worst case) at point x_0^* (11). Besides, its value does not depend on measurements $y_k, k = \overline{1, N}$ and is constant over the entire considered time interval. The admissible set (13) of the estimation error e can be represented as the sum of two subsets

$$e \in \left[-x_0 - x_0^*, \quad 0 \right] + \left[0, \quad +x_0 - x_0^* \right]. \quad (15)$$

The value and sign of the actual estimation error e are unknown. Therefore, we can talk about accepting one of two hypotheses, a hypothesis $H_0: e \leq 0, e \in \left[-x_0 - x_0^*, \quad 0 \right]$ or a hypothesis $H_1: e \geq 0, e \in \left[0, \quad +x_0 - x_0^* \right]$. The acceptance of the hypothesis H_0 with the fulfillment of conditions $e \in \left[-x_0 - x_0^*, \quad 0 \right]$ leads to a guaranteed result

$$v_k \in V_k = \left\{ v \mid \mu_k \leq v \leq \mu_k - \left(-x_0 - x_0^* \right) \right\} = \left[\mu_k, \quad \mu_k - \left(-x_0 - x_0^* \right) \right], \quad k=1, 2, \dots, N. \quad (16)$$

The acceptance of the hypothesis H_0 , while $e \in \left[0, \quad +x_0 - x_0^* \right]$, leads to the fact that

$$\begin{aligned} v_k \notin V_k &= \left\{ v \mid \mu_k \leq v \leq \mu_k - \left(-x_0 - x_0^* \right) \right\} = \left[\mu_k, \quad \mu_k - \left(-x_0 - x_0^* \right) \right], \\ V_k &= \left\{ v \mid \mu_k - \left(+x_0 - x_0^* \right) \leq v \leq \mu_k \right\} = \left[\mu_k - \left(+x_0 - x_0^* \right), \quad \mu_k \right], \quad k=1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (17)$$

An error in setting the set V_k (17) can lead to the fact that the information set \bar{X}_k at some time step k may turn out to be empty: $\bar{X}_k = \emptyset$. In this case, further construction of the sets using the filter equations (4), (5) becomes impossible. However, it may turn out that $\bar{X}_{k-1} \cap X[y_k] \neq \emptyset$, but the result of the estimation is false $x \notin \bar{X}_k$.

In case of this situation, it is possible (given a priori information (15) about the possible values of estimation errors $e \in \left[-x_0 - x_0^*, \quad 0 \right]$ – hypothesis H_0 and $e \in \left[0, \quad +x_0 - x_0^* \right]$ – hypothesis H_1) to solve the guaranteed estimation problem using parallel computations considering the results of the algorithm for different values V_k (16), (17):

1. If, given a hypothesis H_0 / H_1 , it turned out that $v_k \notin V_k$ at some time step k , then the information set obtained by time step k becomes empty $\bar{X}_k = \emptyset$. Starting from a time step $k+1$, an alternative hypothesis is taken into account H_1 / H_0 .

2. If, given a hypothesis H_0 / H_1 , it turned out that $v_k \notin V_k$ at some time step k but the presence of

bounded set $\bar{X}_k \neq \emptyset$ does not allow to recognize this situation, then the criterion for choosing a set V_k is the accuracy of the obtained estimates x_k^* .

To characterize the actual quality of estimation, one can use a sequence of a posteriori residuals of measurements [8, 9, 39, 40].

$$\gamma_k = y_k - x_k^*, \quad x_k^* \in \bar{X}_k = [-x_k, +x_k], \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (18)$$

where x_k^* is the estimate of unknown signal x obtained by the time step k .

Of particular interest is to obtain the best (optimal) estimates x_k^* . These estimates can be obtained by solving the problem of minimizing the function

$$\sum_{k=1}^N \gamma_k^2 \rightarrow \min_{x_k^* \in \bar{X}_k}. \quad (19)$$

Function (19), which is the sum of the squares of a posteriori residuals, carries information about the estimated error of estimation [8, 9]. Therefore, the criterion for choosing the admissible set of realized measurement errors is the accuracy of the obtained point estimates x_k^* of the signal x for different values of V_k (16), (17). In this case, the algorithm accuracy for the selected set V_k is estimated by averaging over the considered measurement interval.

Thus, it is possible to specify the following guaranteed estimation algorithm, which is adaptive to the realized measurement errors.

1. The measurement interval $k = 1, \dots, N$ is divided into equal l sub-intervals.

2. Two competing hypotheses H_0 and H_1 are accepted that the estimation errors e model given in the form of a set of their possible values $e \in [-x_0 - x_0^*, 0]$ and $e \in [0, +x_0 - x_0^*]$ respectively, rather accurately describes the behavior of actual estimation errors on the measurement interval y_1, y_2, \dots, y_l .

3. Following the accepted hypotheses, the admissible sets of measurement errors are calculated (16) and (17), respectively. We will consider the results of the estimation algorithm for different admissible sets of measurement errors.

4. The estimate of the signal x obtained on this measurement interval will be denoted x_l^* and will be found by the criterion of the minimum squared residuals (19), comparing the results of the algorithm for different admissible sets of measurement errors.

5. For the next measurement interval $y_{l+1}, y_{l+2}, \dots, y_{l+l}$ as a priori estimate of the signal x , we will consider the estimate obtained from measurements at the last time steps l : $x_0 = x_l^*, X_0 = \bar{X}_l$.

The measurement processing on the interval $k = \overline{l+1, l+l}$ is carried out in the same way as the measurement processing on the interval $k = \overline{1, l}$. The application of the algorithm does not require storing l measurements, but only calculating and storing estimates with the width of the measurement interval equal to l .

Represent a multi-alternative model of the algorithm in the following form.

Algorithm 1

Step 0. Determine the admissible sets $x_0 \in X_0 = [-x_0, +x_0]$, $v_k \in V = [-v, +v]$, $k = \overline{1, l}$, $l \ll N$.

Step 1. Define $k = 1$.

Step 2. Calculate x_0^* following (11). Accept the hypothesis $H_0 : e \in [-x_0 - x_0^*, 0]$.

Step 3. Calculate μ_k following (10) and the admissible set of measurement errors v_k following (16).

Step 4. Calculate \bar{X}_k following (4), (5).

Step 5. If $\bar{X}_k = \emptyset$, go to *Step 2* of Algorithm 2. Otherwise, go to *Step 6*.

Step 6. Calculate γ_k following (18).

Step 7. Define $k = k + 1$ go to *Step 3*. If $k = l$, go to *Step 8*.

Step 8. Calculate $\sum_{k=1}^l \gamma_k^2$.

Step 9. If the value $\sum_{k=1}^l \gamma_k^2$ corresponding to Step 8 of Algorithm 1 is less than the value $\sum_{k=1}^l \gamma_k^2$ corresponding to Step 8 of Algorithm 2, define $k = l + 1$, $X_0 = \bar{X}_l$ and go to Step 2. Otherwise, go to Step 2 of Algorithm 2.

Algorithm 2

Step 0. Determine the admissible sets $x_0 \in X_0 = [-x_0, +x_0]$, $v_k \in V = [-v, +v]$, $k = \bar{1}, l$, $l \ll N$.

Step 1. Define $k = 1$.

Step 2. Calculate x_0^* following (11). Accept the hypothesis $H_1 : e \in [0, +x_0 - x_0^*]$.

Step 3. Calculate μ_k following (10) and the admissible set of measurement errors v_k following (17).

Step 4. Calculate \bar{X}_k following (4), (5).

Step 5. If $\bar{X}_k = \emptyset$, go to Step 2 of Algorithm 1. Otherwise, go to Step 6.

Step 6. Calculate γ_k following (18).

Step 7. Define $k = k + 1$ go to Step 3. If $k = l$, go to Step 8.

Step 8. Calculate $\sum_{k=1}^l \gamma_k^2$.

Step 9. If the value $\sum_{k=1}^l \gamma_k^2$ corresponding to Step 8 of Algorithm 2 is less than the value $\sum_{k=1}^l \gamma_k^2$ corresponding to Step 8 of Algorithm 1, define $k = l + 1$, $X_0 = \bar{X}_l$ and go to Step 2. Otherwise, go to Step 2 of Algorithm 1.

Numerical simulations

The problem of constant signal estimation from noisy measurements is considered

$$y_k = x + v_k, \quad k = 1, \dots, N. \tag{20}$$

The true value is $x = 0.5$, the number of measurements is $N = 100$. The noisy measurements y_k (20) and measurement errors v_k are shown in Fig. 1. The measurement errors are assumed to be zero mean Gaussian white noise sequence with standard deviation $\sigma_v = 0.17$. The prior admissible sets are taken as follows:

$$X_0 = [-x_0, +x_0] = [-1, 1], \quad V = [-v, +v] = [-3\sigma_v, 3\sigma_v].$$

As Fig. 1b shows, the realization of measurement errors is such that $|v_k| \ll 3\sigma_v$.

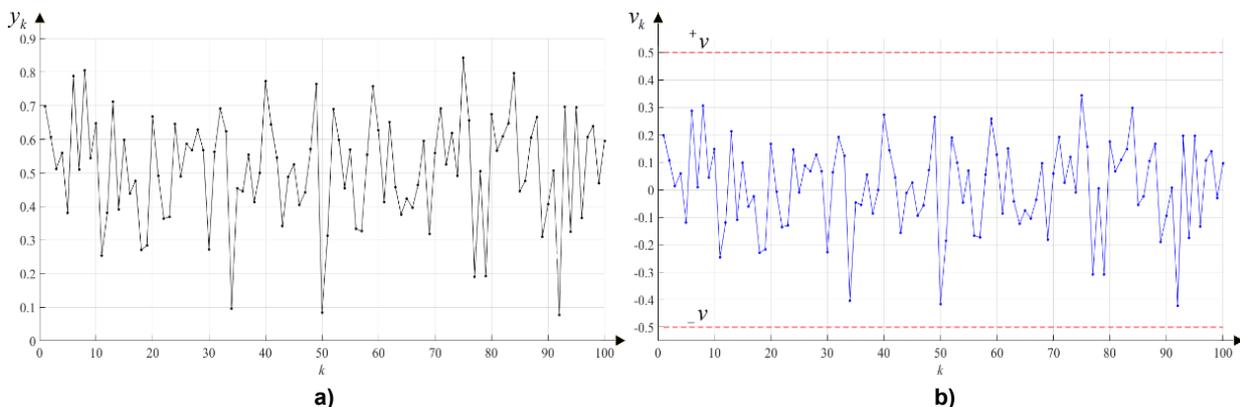


Fig. 1. The processes considered in the example: a – noisy measurements y_k ; b – measurement errors v_k

The measurement interval was divided into 5 equal sub-intervals. According to the results of measurement processing, the information set of possible values of the signal x is obtained (Fig. 2)

$$x \in \bar{X}_N = [0.4688, 0.5], \quad x_N^* = 0.4844, \quad k \in [80, 100].$$

The information set of possible values of the signal x computed by “non-adaptive” filter is (Fig. 2)

$$x \in \bar{X}_N = [0.3431, 0.5779], \quad x_N^* = 0.4605, \quad k \in [92, 100].$$

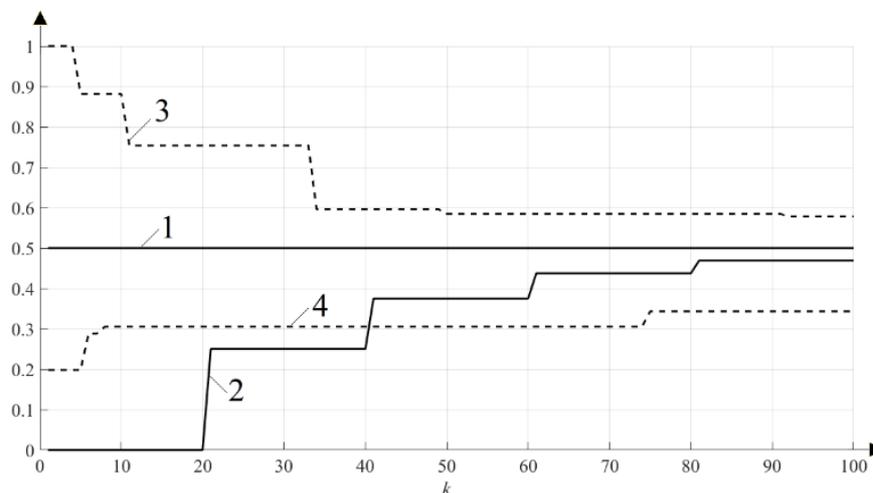


Fig. 2. Bounded estimates of the signal x : 1, 2 – respectively the upper and lower bounds of the information set computed by the adaptive guaranteed algorithm; 3, 4 – respectively the upper and lower bounds of the information set computed by “non-adaptive” algorithm

The maximum possible error of the adaptive filter is $\max_{c \in \bar{X}_N} |x - c| = 0.0312$, and that of “non-adaptive” filter becomes $\max_{c \in \bar{X}_N} |x - c| = 0.1569$. As a quantitative characteristic of the efficiency of

the proposed adaptive estimation algorithm, consider the ratio $\delta_N = \frac{\bar{X}_N}{X_0} \cdot 100\%$ of intervals

$$\bar{X}_N = [-x_N, +x_N] \text{ and } X_0 = [-x_0, +x_0].$$

The quantity δ shows what part of the prior uncertainty is the information set [41]. The information set computed by the adaptive guaranteed algorithm does not exceed 2% ($\delta = 1.56$) of the prior uncertainty value, while the information set computed by the “non-adaptive” guaranteed algorithm exceeds 11% ($\delta = 11.74$) of the prior uncertainty value.

Application of the Kalman Filter

Recurrence equations of LSE [3, 8]

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + p_k r^{-1} (y_k - \hat{x}_{k-1}), \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (21)$$

$$p_k = (p_{k-1}^{-1} + r^{-1})^{-1}. \quad (22)$$

As mentioned above, equations (21), (22) are the KF equations for the considered problem (20). The variance of measurement errors is known: $r = \sigma_v^2$. Initial conditions for the KF are: $x \in N(0, p_0)$,

$$\hat{x}_0 = 0, \quad p_0 = \frac{1}{9}.$$

From a comparison of the results of the adaptive guaranteed estimation and the KF (Fig. 3, Table 1), it follows that the implementation of the adaptive guaranteed estimation algorithm made it possible to reduce the initial uncertainty in the knowledge of the signal x by 64 times, and the use of the Kalman filter – by 20 times.

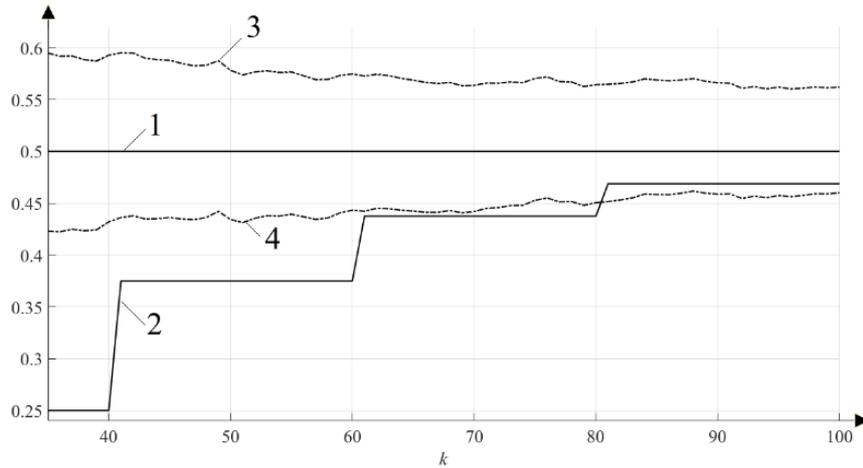


Fig. 3. Bounded estimates of the signal x : 1, 2 – respectively the upper and lower bounds of the information set; 3, 4 – respectively the upper $+3\sigma$ and lower -3σ bounds of the confidence set computed by the KF

Table 1

Characteristics of bounded estimates

k	Adaptive guaranteed algorithm		The Kalman Filter	
	$\max_{c \in \bar{X}_k} x - c $	δ_k	$\max_{c \in [-3\sqrt{p_k}, 3\sqrt{p_k}]} x - c $	δ_k
20	0.5	25	0.1330	11.33
40	0.25	12.5	0.0928	8.04
60	0.125	6.25	0.0726	6.57
80	0.0625	3.125	0.0643	5.7
100	0.0312	1.56	0.0620	5.09

For the relative errors of the Kalman estimate \hat{x}_N and the estimate x_N^* of the adaptive guaranteed algorithm, respectively, we have (Fig. 4, Table 2)

$$\frac{|x - \hat{x}_N|}{\max_{c \in [-3\sqrt{p_N}, 3\sqrt{p_N}]} |x - c|} \cdot 100\% = 17.74\%, \quad \frac{|x - x_N^*|}{\max_{c \in \bar{X}_N} |x - c|} \cdot 100\% = 50\%.$$

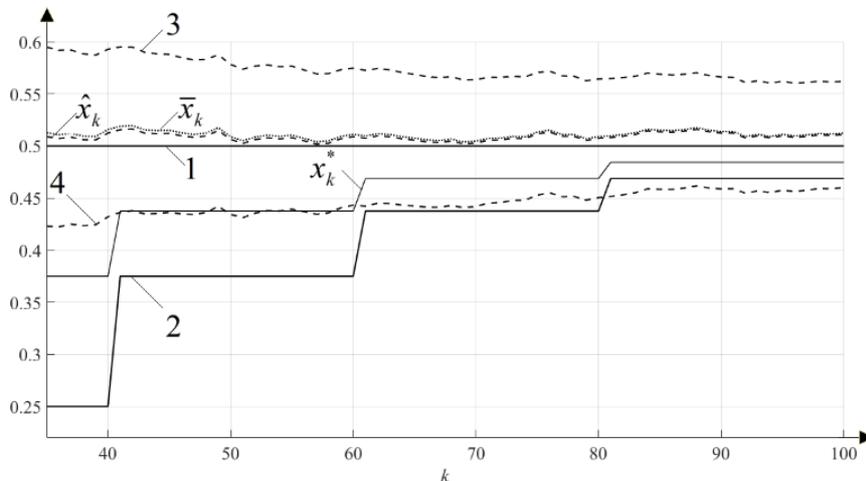


Fig. 4. Point estimates of the signal x : 1, 2 – respectively the upper and lower bounds of the information set; 3, 4 – respectively the upper $+3\sigma$ and lower -3σ bounds of the confidence set computed by the KF

Characteristics of point estimates

k	The Kalman filter		Adaptive guaranteed algorithm		Mean type method	
	\hat{x}_k	estimation error $ x - \hat{x}_k $	x_k^*	estimation error $ x - x_k^* $	$\bar{x}_k = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_i$	estimation error $ x - x_k^* $
20	0.5197	0.0197	0.25	0.25	0.5265	0.0265
40	0.5124	0.0124	0.375	0.125	0.5157	0.0157
60	0.5090	0.0090	0.4375	0.0625	0.5112	0.0112
80	0.5074	0.0074	0.4688	0.0312	0.5090	0.0090
100	0.5110	0.0110	0.4844	0.0156	0.5124	0.0124

The relative error of the Kalman estimate \hat{x}_N turned out to be 3 times less than the relative error of the estimate x_N^* of the adaptive guaranteed algorithm. The Kalman estimate turns out to be more accurate since the real probability distribution law of measurement errors v_k is Gaussian. The estimate of the guaranteed algorithm is selected based on the worst realization of measurement errors. In the case of a single realization of measurements $\{y_k\}_{k=1}^N$, the solution of the guaranteed estimation problem, when the estimate is a point which is equidistant from bounds of the information set (middle point of the interval), is nonrational [41]. In the considered example, the true value of the signal x is on the border of the information set. However, in practice, such a situation cannot be recognized.

Consider the measurement errors v_k in terms of uniformly distributed in the interval $[-v, v]$ white noise at level of about $v = 0.5$ (Fig. 5). The prior admissible sets are

$$X_0 = [-x_0, +x_0] = [-1, 1], \quad V = [-v, +v] = [-0.5, 0.5].$$

Initial conditions for the KF are: $x \in N(0, p_0)$, $\hat{x}_0 = 0$, $p_0 = \frac{1}{9}$, $r = (0.5/3)^2$.

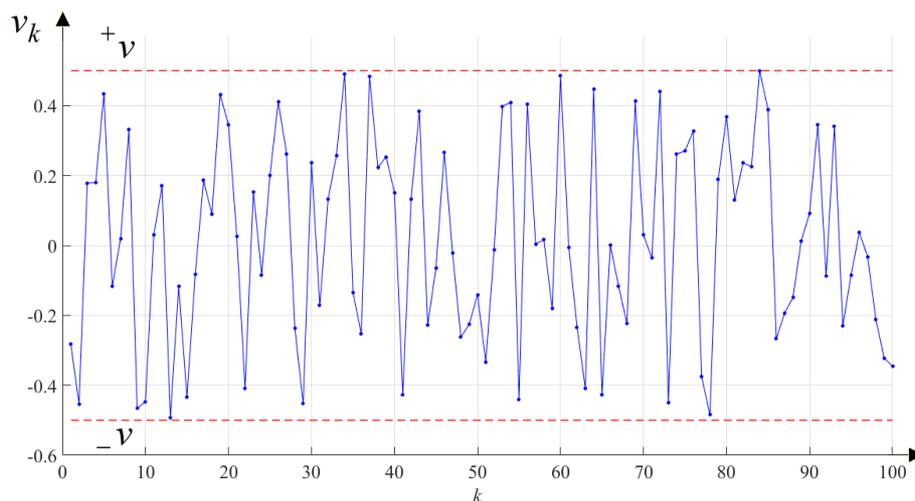


Fig. 5. Measurement errors v_k

As Fig. 5 shows, the realization of measurement errors is such that at some time steps $|v_k| \approx 0,5$.

A comparison of the results of “non-adaptive” guaranteed estimation and the KF is shown in Fig. 6 and Table. 3.

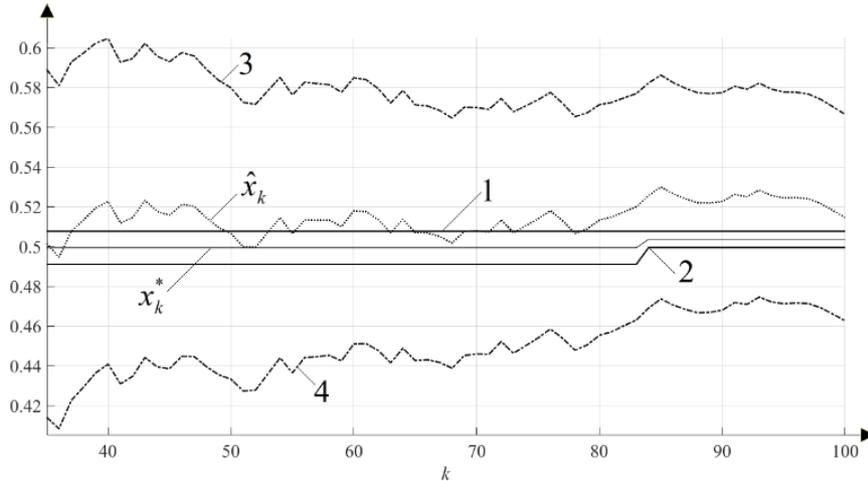


Fig. 6. Bounded estimates of the signal x : 1, 2 – respectively the upper and lower bounds of the information set; 3, 4 – respectively the upper $+3\sigma$ and lower -3σ bounds of the confidence set computed by the KF

Table 3

Characteristics of bounded estimates

k	Guaranteed algorithm		The Kalman filter	
	$\max_{c \in \bar{X}_k} x - c $	δ_k	$\max_{c \in [-3\sqrt{p_k}, 3\sqrt{p_k}]} x - c $	δ_k
20	0.0653	3.65	0.1463	11.54
40	0.009	0.83	0.1046	8.19
60	0.009	0.83	0.0848	6.69
80	0.009	0.83	0.0713	5.8
100	0.0077	0.41	0.0664	5.19

The information set $\bar{X}_N = [-x_N, +x_N]$ computed by the guaranteed algorithm does not exceed 1% ($\delta = 0.41$) of the prior uncertainty value, while the confidence set $[-3\sqrt{p_N}, 3\sqrt{p_N}]$ computed by the KF exceeds 5% ($\delta = 5.19$) of the prior uncertainty value. The maximum possible error of the guaranteed estimate is $\max_{c \in \bar{X}_N} |x - c| = 0.0077$, which is almost 10 times less than the maximum possible error of the Kalman estimate, which is $\max_{c \in [-3\sqrt{p_N}, 3\sqrt{p_N}]} |x - c| = 0.0664$. In addition, the true value of the signal x may not belong to the confidence set: $x \notin [-3\sqrt{p_N}, 3\sqrt{p_N}]$.

Thus, in the case when the admissible set of measurement errors $V = [-v, +v]$ is adequate to the realized measurement errors so that the measurement errors can take values on the set bound or close to its bound, the guaranteed estimation errors are minimal. For the considered realization of measurement errors (Fig. 5), at time steps $k = 13, 34, 84$ the values of measurement errors are closest to the boundary values. At these time steps, the guaranteed algorithm provides the most accurate estimates. In this case, the application of adaptive methods is not required.

Conclusion

The article has proposed a solution to the problem of adaptive guaranteed estimation for a constant signal from noisy measurements. It is based on a multi-alternative method when a set (bank) of filters is used, with each of which tuned to a specific hypothesis about possible realizations of measurement errors. Filter residuals are used to compute estimates of realized measurement errors. Choosing the possi-

ble implementation of errors is made by using a composed function that makes sense of the variance of residuals over a short time interval.

Numerical simulations have confirmed the effectiveness of the proposed adaptive guaranteed estimation algorithm. Exploring further the issues: the statement of the necessary criterion for an opportunity of adaptive adjustment of the algorithm; properties of the adaptive filter on short time intervals; generalization of obtained results to the multidimensional case in the presence of unknown bounded disturbances. One of the promising directions for further research is the development of an algorithm that combines the guaranteed estimation algorithm and the Kalman filter.

The work was supported by Act 211 Government of the Russian Federation, contract No. 02.A03.21.0011.

References

1. Fomin V.N. *Rekurrentnoye otsenivaniye i adaptivnaya fil'tratsiya* [Recurrent Estimation and Adaptive filtering]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 288 p.
2. Sorenson H.W. Least-squares estimation: from Gauss to Kalman. *IEEE Spectrum*, 1970, vol. 7, iss. 7, pp. 63–68.
3. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering*, 1960, vol. 82, pp. 35–45.
4. Stepanov O.A. Kalman Filtering: Past and Present. An Outlook from Russia. *Gyroscopy and Navigation*, 2011, vol. 2, iss. 2, pp. 99–110.
5. Kalman R.E. Identification of noisy systems. *Russian Mathematical Surveys*, 1985, vol. 40, iss. 4, pp. 25–42.
6. Jazwinski A.H. Adaptive filtering. *Automatica*, 1969, no. 4, pp. 475–485.
7. Mehra R.K. Approaches to adaptive filtering. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1972, vol. 17, iss. 5, pp. 693–698.
8. Malyshev V.V., Kibzun A.I. *Analiz i sintez vysokotochnogo upravleniya letatel'nyimi apparatami* [Analysis and Synthesis of High-Precision Control of Aircrafts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 302 p.
9. Kantorovich L.V. [On Some New Approaches to Computational Methods and Observation Processing]. *Siberian Mathematical Journal*, 1962, vol. 3, no. 5, pp. 701–709. (in Russ.)
10. Schweppe F. Recursive state estimation: Unknown but bounded errors and system input. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1968, vol. 13, iss.1, pp. 22–28.
11. Bertsekas D., Rhodes I. Recursive state estimation for a set-membership description of uncertainty. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1971, vol. 16, iss. 2, pp. 117–128.
12. Kats I.Ya., Kurzanski A.B. [Minimax Multi-Step Filtering in Statistically Uncertain Situations]. *Automation and Remote Control*, 1979, vol. 39, iss. 11, pp. 1643–1650. (in Russ.)
13. Bakan G.M. [Non-Statistical Statement and Solution of One Filtering Problem]. *Automation and Remote Control*, 1983, vol. 44, iss. 9, pp. 1125–1136. (in Russ.)
14. Kane V.M. *Optimizatsiya sistem upravleniya po minimaksnomu kriteriyu* [Optimization of Control Systems According to the Minimax Criterion]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 258 p.
15. Chernousko F.L. [Guaranteed Uncertainty Estimates Using Ellipsoids]. *Soviet Mathematics. Doklady*, 1980, vol. 251, no. 1, pp. 51–54. (in Russ.)
16. Kurzanskiy A.B. [The Identification Problem – Theory of Guaranteed Estimates]. *Automation and Remote Control*, 1991, vol. 52, iss. 4, pp. 447–465. (in Russ.)
17. Shiryaev V.I. [Synthesis of Control of Linear Systems in Incomplete Information]. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 1994, no. 3, pp. 229–237. (in Russ.)
18. Shiryaev V.I. [Control Algorithms for Dynamical Systems under Uncertainty]. *Mekhatronika*, 2001, no. 8, pp. 2–5. (in Russ.)
19. Kuntsevich V.M. *Upravleniye v usloviyakh neopredelennosti: garantirovannyye rezul'taty v zadache upravleniya i identifikatsii* [Control under Uncertainty: Guaranteed Results in Control and Identification Problems]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 2006, 264 p.
20. Polyak B.T., Topunov M.V. Filtering under Nonrandom Disturbances: the Method of Invariant Ellipsoids. *Doklady Mathematics*, 2008, vol. 77, no.1, pp. 158–162. (in Russ.)

21. Matasov A.I. *Metod garantiruyushchego otsenivaniya* [Guaranteed Estimation Method]. Moscow, Moscow State University Publ., 2009, 100 p.
22. Nazin S.A., Polyak B.T. Ellipsoid-based parametric estimation in the linear multidimensional systems with uncertain model description. *Automation and Remote Control*, 2007, vol. 68, iss. 6, pp. 993–1005. (in Russ.)
23. Salnikov N.N. Estimation of State and Parameters of Dynamic System with the Use of Ellipsoids at the Lack of a Priori Information on Estimated Quantities. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2014, no. 2, pp. 144–156. (in Russ.)
24. Shalygin A.S., Lysenko L.N., Tolpegin O.A. *Modeling Techniques of Situational Control of the Movement of Unmanned Aerial Vehicles*. Eds. A.V. Nozdrachev and L.N. Lysenko. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012, 584 p.
25. Le V.T.H., Stoica C., Alamo T., Camacho E.C., Dumur D. *Zonotopes: from Guaranteed State-estimation to Control*. Wiley-ISTE, 2013, 335 p.
26. Blanchini F., Miani S. *Set-Theoretic Methods in Control*. Birkhauser, 2015, 630 p.
27. Elyasberg P.E. *Measurement information: how much is it needed? How to process it?* Moscow, Nauka Publ., 1983, 209 p.
28. Koscheev A.S., Kurzhansky A.B. [Adaptive Estimation of Multistep Systems Evolution under Uncertainty]. *Engineering Cybernetics*, 1983, no. 2, pp. 72–93. (in Russ.)
29. Barabanov A.E. Linear filtering with adaptive adjustment of the disturbance covariation matrices in the plant and measurement noise. *Automation and Remote Control*, 2016, vol. 77, pp. 21–36.
30. Gritsenko N.S., Gusarov A.I., Loginov V.P., Sevastyanov K.K. [Adaptive Estimation. Part 1]. *Zarubezhnaya Radioelektronika*, 1983, no. 7, pp. 3–27. (in Russ.)
31. Pervachev S.V., Perov A.I. *Adaptivnaya fil'tratsiya soobshcheniy* [Adaptive Message Filtering]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1991, 160 p.
32. Kogan M.M. Optimal estimation and filtration under unknown covariances of random factors. *Automation and Remote Control*, 2014, vol. 75, iss. 11, pp. 1964–1981.
33. Magill D.T. Optimal Adaptive Estimation of Sampled Stochastic Processes. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1965, vol. 10, iss. 4, pp. 434–439.
34. Lainiotis D.G. Partitioning: A unifying framework for adaptive systems, I: Estimation. *Proceedings of the IEEE*, 1976, vol. 64, iss. 8, pp. 1126–1143.
35. Koshaev D.A. Kalman filter-based multialternative method for fault detection and estimation. *Automation and Remote Control*, 2010, vol. 71, pp. 790–802.
36. Dmitriev S.P., Stepanov O.A. [Multialternative filtering in navigation information processing problem]. *Radioengineering*, 2004, no. 7, pp. 11–17. (in Russ.)
37. Fisher K.A., Maybeck P.S. Multiple model adaptive estimation with filter spawning. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, vol. 38, iss. 3, pp. 755–768.
38. Rong Li X., Jilkov V.P. Survey of maneuvering target tracking. Part V. Multiple-model methods. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, vol. 41, iss. 4, pp. 1255–1321.
39. Khadanovich D.V., Shiryayev V.I. On the estimation of measurement errors in linear dynamical systems. *Proceedings of 2016 3rd Russian Conference "Mathematical Modeling and Information Technologies" (MMIT 2016)*, 2016, vol. 1825, pp. 35–43.
40. Khadanovich D.V., Shiryayev V.I. To the Problem of Measurement Errors Estimation in Control Systems with Incomplete Information. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Computer technologies, automatic control, radioelectronics*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 25–40. (in Russ.)
41. Sheludko A.S., Shiryayev V.I. Minimax Filtering Algorithm for One-Dimensional Chaotic Process. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 5, pp. 8–12. (in Russ.)

Received 24 September 2020

АДАПТИВНОЕ ГАРАНТИРОВАННОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПОСТОЯННОГО СИГНАЛА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ

Д.В. Хаданович, В.И. Ширяев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В задачах гарантированного оценивания в условиях неопределенности относительно возмущений и ошибок измерений определены допустимые множества их возможных значений. Решение выбирается из условия оптимизации гарантированных множественных оценок, соответствующих наихудшей реализации значений возмущений и ошибок измерений. Результатом гарантированного оценивания является неулучшаемая множественная оценка (информационное множество), которая может оказаться излишне пессимистичной (перестраховочной), если допустимые множества значений ошибок измерений слишком большие по сравнению с реализовавшимися значениями ошибок. Так, на коротком интервале наблюдений допустимые множества значений возмущений и ошибок измерений могут оказаться лишь грубыми оценками сверху. **Целью исследования** является повышение точности гарантированного оценивания, когда ошибки измерений реализуются не наихудшим образом, т. е. среда, в которой функционирует объект, ведет себя не так агрессивно, как это заложено в априорных данных о допустимом множестве ошибок. **Методы исследования.** Рассматривается задача адаптивного гарантированного оценивания величины постоянного сигнала по зашумленным измерениям. Задача адаптивной фильтрации заключается в том, чтобы в процессе обработки зашумленных измерений, из всего множества возможных реализаций ошибок выбрать ту, которая порождает бы имеющуюся последовательность измерений. **Результаты.** Представлен адаптивный алгоритм гарантированного оценивания. Построение адаптивного алгоритма основано на многоальтернативном методе на основе банка фильтров Калмана. В методе применяется набор фильтров, каждый из которых настроен на конкретную гипотезу о модели ошибок измерений. Невязки фильтров используются для вычисления оценок реализовавшихся ошибок измерений. Выбор возможной реализации ошибок осуществляется при помощи функционала, имеющего смысл дисперсии невязок на коротком интервале времени. **Заключение.** Приведены вычислительная схема адаптивного алгоритма, численный пример и сравнительный анализ полученных оценок.

Ключевые слова: оценивание постоянного сигнала, гарантированное оценивание, адаптивный алгоритм, множественная оценка, невязка измерений.

Статья выполнена при поддержке Правительства РФ (Постановление № 211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02.А03.21.0011.

Литература

1. Фомин, В.Н. Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация / В.Н. Фомин. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
2. Sorenson, H.W. Least-squares estimation: from Gauss to Kalman / H.W. Sorenson // IEEE Spectrum. – 1970. – Vol. 7, iss. 7. – P. 63–68.
3. Kalman, R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems / R.E. Kalman // Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering. – 1960. – Vol. 82. – P. 35–45.
4. Stepanov, O.A. Kalman Filtering: Past and Present. An Outlook from Russia / O.A. Stepanov // Gyroscopy and Navigation. – 2011. – Vol. 2, iss. 2. – P. 99–110.
5. Kalman, R.E. Identification of noisy systems / R.E. Kalman // Russian Mathematical Surveys. – 1985. – Vol. 40. – Issue 4. – P. 25–42.
6. Jazwinski, A.H. Adaptive filtering / A.H. Jazwinski // Automatica. – 1969. – No. 5. – P. 475–485.
7. Mehra, R.K. Approaches to adaptive filtering / R.K. Mehra // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1972. – Vol. 17, iss. 5. – P. 693–698.

8. Малышев, В.В. Анализ и синтез высокоточного управления летательными аппаратами / В.В. Малышев, А.И. Кибзун. – М.: Машиностроение, 1987. – 302 с.
9. Канторович, Л.В. О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдений / Л.В. Канторович // Сибирский математический журнал, 1962. – Т. 3, № 5. – С. 701–109.
10. Schweppe, F. Recursive state estimation: Unknown but bounded errors and system input / F. Schweppe // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1968. – Vol. 13, iss. 1. – P. 22–28.
11. Bertsekas, D. Recursive state estimation for a set-membership description of uncertainty / D. Bertsekas, I. Rhodes // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1971. – Vol. 16, iss. 2. – P. 117–128.
12. Кац, И.Я. Минимаксная многошаговая фильтрация в статистически неопределенных ситуациях / И.Я. Кац, А.Б. Куржанский // Автоматика и телемеханика. – 1978. – № 11. – С. 79–87.
13. Бакан, Г.М. Нестатистическая постановка и решение одной задачи фильтрации / Г.М. Бакан // Автоматика и телемеханика. – 1983. – № 9. – С. 32–44.
14. Кейн, В.М. Оптимизация систем управления по минимаксному критерию / В.М. Кейн. – М.: Наука, 1985. – 248 с.
15. Черноусько, Ф.Л. Гарантированные оценки неопределенных величин при помощи эллипсоидов / Ф.Л. Черноусько // Доклады АН СССР. – 1980. – Т. 251, № 1. – С. 51–54.
16. Куржанский, А.Б. Задача идентификации – теория гарантированных оценок / А.Б. Куржанский // Автоматика и телемеханика. – 1991. – № 4. – С. 3–26.
17. Ширяев, В.И. Синтез управления линейными системами при неполной информации / В.И. Ширяев // Изв. РАН, ТуСУ. – 1994. – № 3. – С. 229–237.
18. Ширяев, В.И. Алгоритмы управления динамическими системами в условиях неопределенности / В.И. Ширяев // Мехатроника. – 2001. – № 8. – С. 2–5.
19. Кунцевич, В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации / В.М. Кунцевич. – К.: Наукова думка, 2006. – 264 с.
20. Поляк, Б.Т. Фильтрация при неслучайных возмущениях: метод инвариантных эллипсоидов / Б.Т. Поляк, М.В. Топунов // Доклады АН. – 2008. – Т. 418, № 6. – С. 749–753.
21. Матасов, А.И. Метод гарантирующего оценивания / А.И. Матасов. – М.: Изд-во МГУ, 2009. – 100 с.
22. Назин, С.А. Параметрическое оценивание методом эллипсоидов в линейных многомерных системах с неопределенным описанием модели / С.А. Назин, Б.Т. Поляк // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 6. – С. 67–80.
23. Сальников, Н.Н. Эллипсоидальное оценивание состояний и параметров динамической системы при отсутствии априорной информации / Н.Н. Сальников // Проблемы управления и информатики. – 2014. – № 2. – С. 144–156.
24. Шалыгин, А.С. Методы моделирования ситуационного управления движением беспилотных летательных аппаратов. / А.С. Шалыгин, Л.Н. Лысенко, О.А. Толпегин; под ред. А.В. Ноздрачева и Л.Н. Лысенко – М.: Машиностроение, 2012. – 584 с.
25. Le, V.T.H. Zonotopes: from Guaranteed State-estimation to Control / V.T.H. Le, C. Stoica, T. Alamo, E.C. Camacho, D. Dumur. – Wiley-ISTE, 2013. – 335 p.
26. Blanchini, F. Set-Theoretic Methods in Control / F. Blanchini, S. Miani. – Birkhauser, 2015. – 630 p.
27. Эльясберг П.Е. Измерительная информация: сколько её нужно? Как её обрабатывать? / П.Е. Эльясберг. – М.: Наука, 1983. – 209 с.
28. Коцеев, А.С. Адаптивное оценивание эволюции многошаговых систем в условиях неопределенности / А.С. Коцеев, А.Б. Куржанский // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1983. – № 2. – С. 72–93.
29. Varabanov, A.E. Linear filtering with adaptive adjustment of the disturbance covariation matrices in the plant and measurement noise / A.E. Varabanov // Automation and Remote Control. – 2016. – Vol. 77. – P. 21–36.
30. Гриценко, Н.С. Адаптивное оценивание. Часть 1 / Н.С. Гриценко, А.И. Гусаров, В.П. Логинов, К.К. Севастьянов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1983. – № 7. – С. 3–27.

31. Первачев, С.В. Адаптивная фильтрация сообщений / С.В. Первачев, А.И. Перов. – М.: Радио и связь, 1991. – 160 с.
32. Kogan, M.M. Optimal estimation and filtration under unknown covariances of random factors / M.M. Kogan // *Automation and Remote Control*. – 2014. – Vol. 75, iss. 11. – P. 1964–1981.
33. Magill, D.T. Optimal Adaptive Estimation of Sampled Stochastic Processes / D.T. Magill // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 1965. – Vol. 10, iss. 4. – P. 434–439.
34. Lainiotis, D.G. Partitioning: A unifying framework for adaptive systems, I: Estimation / D.G. Lainiotis // *Proceedings of the IEEE*. – 1976. – Vol. 64, iss. 8. – P. 1126–1143.
35. Koshaev, D.A. Kalman filter-based multialternative method for fault detection and estimation / D.A. Koshaev // *Automation and Remote Control*. – 2010. – Vol. 71. – P. 790–802.
36. Дмитриев, С.П., Многоальтернативная фильтрация в задачах обработки навигационной информации / С.П. Дмитриев, О.А. Степанов // *Радиотехника*. – 2004. – № 7. – С. 11–17.
37. Fisher, K.A. Multiple model adaptive estimation with filter spawning / K.A. Fisher, P.S. Maybeck // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. – 2002. – Vol. 38, iss. 3. – P. 755–768.
38. Rong, Li X. Survey of maneuvering target tracking. Part V. Multiple-model methods / X. Rong Li, V.P. Jilkov // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. – 2005. – Vol. 41, iss. 4. – P. 1255–1321.
39. Khadanovich, D.V. On the estimation of measurement errors in linear dynamical systems / D.V. Khadanovich, Shiryayev V.I. // *Proceedings of 2016 3rd Russian Conference “Mathematical Modeling and Information Technologies” (ММИТ 2016)*. – 2016. – Vol. 1825. – P. 35–43.
40. Хаданович, Д.В. К задаче оценивания ошибок измерений в системах управления при неполной информации / Д.В. Хаданович, В.И. Ширяев // *Вестн. ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 25–40.
41. Шелудько, А.С. Алгоритм минимаксной фильтрации для одномерного хаотического процесса / А.С. Шелудько, В.И. Ширяев // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2014. – № 5. – С. 8–12.

Хаданович Дина Валентиновна, младший научный сотрудник кафедры систем автоматического управления, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; khadanovichdv@susu.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 24 сентября 2020 г.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Khadanovich, D.V. Adaptive Guaranteed Estimation of a Constant Signal under Uncertainty of Measurement Errors / D.V. Khadanovich, V.I. Shiryayev // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 22–36. DOI: 10.14529/ctcr200403

FOR CITATION

Khadanovich D.V., Shiryayev V.I. Adaptive Guaranteed Estimation of a Constant Signal under Uncertainty of Measurement Errors. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 22–36. DOI: 10.14529/ctcr200403

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

И.В. Каракулов, А.В. Клюев, В.Ю. Столбов

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

Введение. Рассматривается задача прогнозирования состояния электроприводного центробежного насоса в процессе эксплуатации. Простои и недоборы, вызванные поломкой насоса, приводят к потерям при добыче нефти и требуют времени для замены оборудования. При помощи прогнозирования технического состояния появляется возможность минимизировать затраты на обслуживание насоса и сократить время простоя скважины. Для анализа состояния систем используют экспертные системы, основанные на знаниях, и методы предиктивной аналитики, основным из которых является использование моделей машинного обучения. В работе используются методы, основанные на искусственных нейронных сетях. **Цель исследования.** Проработка вопросов возможности прогнозирования технического состояния насоса за счет использования современных моделей машинного обучения. **Материалы и методы.** Прогнозирование технического состояния оборудования осуществляется при помощи анализа временных рядов. Данные получены с телеметрических датчиков системы мониторинга, установленных на электроцентробежном насосе. Исходные данные снимались с интервалом в одну минуту. Была осуществлена предобработка исходных данных. Данные были очищены от пиков, которые явно выбиваются из нормального режима работы, и убраны периоды простоя скважины, на которых фазное напряжение равнялось нулю. Для прогнозирования временных рядов используется искусственная нейронная сеть с типом нейронов LSTM. Прогнозирование временного ряда осуществлялось на пять дней. Оценка параметров системы на длительные периоды времени позволяет оценить состояние ее компонентов и предотвращать поломку оборудования. **Результаты.** Исследованы возможности нейросетей, обученных на основе данных телеметрических датчиков системы мониторинга, предсказывать значения вертикальной вибрации насоса. Обосновано применение нейросетевой модели в виде LSTM, показавшей хорошие результаты при анализе временных рядов. Выявлено, что нейросети хорошо улавливают тренд внутри временного ряда, что говорит о возможности их применения совместно с экспертной системой. **Заключение.** Предложенные методы и модели апробированы на реальных данных, что подтверждает возможность их использования при разработке интеллектуальной информационной системы управления техническим состоянием электроцентробежного насоса в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: электроприводный центробежный насос, прогнозирование, временные ряды, искусственная нейронная сеть, оценка точности прогнозирования, LSTM сеть.

Введение

Нефтяные месторождения часто находятся в труднодоступных местах. В настоящее время при каждой поломке нефтедобывающей установки требуется сформировать и отправить на объект ремонтную группу, которая на месте проводит анализ поломки и производит ремонт. Каждая поломка оборудования приводит к простоям нефтедобывающей установки, что влечет за собой значительные убытки и нарушение поставок продукта.

Для уменьшения простоев, вызванных поломкой оборудования, требуется непрерывный мониторинг состояния оборудования. Главной задачей является выявление неполадок в нефтедобывающем оборудовании до момента аварии. Это позволит сэкономить время на отправку ремонтной группы, которая сможет предотвратить будущую аварию. При этом важно сократить число ошибок, чтобы в будущем избежать ситуаций, при которых ремонтная группа была отправлена на объект, а оборудование работает исправно.

Одной из главных частей нефтедобывающей установки является электроприводный центробежный насос (ЭЦН). Ремонт ЭЦН – долгий процесс, который включает в себя поднятие насоса

на поверхность, ремонт и погружение обратно в скважину. На каждом ЭЦН используются датчики контроля. Датчики снимают различные показатели, такие как давление, температура, вибрация, сила тока и т. п. При анализе данных, полученных при помощи датчиков, можно спрогнозировать состояние системы и диагностировать будущую поломку. Например, как отмечено в [1], на исследуемом месторождении производится круглосуточное наблюдение в режиме реального времени за работой ЭЦН, что способствует увеличению срока службы оборудования. Увеличение срока службы достигается за счет предотвращения неправильного использования насоса и отслеживания чрезмерных нагрузок.

Для автоматизированной оценки состояния узлов ЭЦН используются экспертные системы основанные на знаниях и нечеткой логике [2–5]. Известные экспертные системы используют продукционную модель представления знаний, что позволяет прогнозировать отказ ЭЦН и определять причины, из-за которых произошла поломка, за счет получения и сопоставления трендов, полученных с участков временного ряда значений измеряемых параметров функционирования оборудования, с определенным набором правил для допустимых изменений этих параметров. Основной трудностью при разработке подобных информационных систем является формирование актуальной базы знаний, основанной на опыте экспертов и данных о прошедших поломках.

В настоящее время в мире бурно развиваются методы ИИ, включая предиктивную аналитику [6, 7], основанную на глубокой обработке данных (data mining) с помощью машинного обучения и нейросетевых технологий. Однако известны лишь единичные случаи внедрения методов ИИ в нефтегазовой отрасли. Например, как отмечено в [8], норвежская нефтяная компания Equinor в 2018 г. сообщила о создании Центра сбора и обработки данных для улучшения процесса принятия управленческих решений.

В создании подобных интеллектуальных информационных систем (ИИС) заинтересованы и многие крупные российские нефтегазовые компании. Однако для разработки и внедрения ИИС в практику нефтедобычи необходимо проработать вопросы применимости существующих методов ИИ и, в случае положительного результата исследований, разработать на их базе модели, способные по информации, поступающей с оборудования в режиме реального времени, определять его техническое состояние и предсказывать возможные поломки узлов и отказы в ближайшем будущем. Для построения подобных моделей, основанных, например, на нейросетевых технологиях, необходимы большие массивы данных, полученных с датчиков за длительный период времени эксплуатации, а также сведения о произошедших поломках и проведенных ремонтах оборудования. Кроме того, для выявления возможных аномалий в работе оборудования, необходимо с помощью экспертов накопить необходимые знания, на основе которых можно сформировать критерии наступления различных аномалий по многофакторному анализу данных, поступающих с датчиков за определенный период.

Поэтому **целью** настоящей работы является проработка вопросов применения методов искусственного интеллекта для оценки технического состояния узлов электроцентробежных насосов на основе глубокой обработки текущих данных с помощью нейросетевых технологий.

Обработка исходных данных

Для анализа состояния ЭЦН был получен массив данных с одной из нефтедобывающих платформ, расположенной на шельфе Печерского моря. Изучались данные, полученные с добывающих скважин, каждая из которых характеризуется следующим набором технологических параметров: значение (для каждой фазы) трехфазного напряжения электропитания, В; ток электродвигателя, А; забойное давление на кровлю пласта, МПа; давление на приеме насоса, МПа; давление на выкиде насоса, МПа; давление в затрубном пространстве, МПа; давление на устье скважины, МПа; температура на приеме насоса, °С; температура на выкиде насоса, °С; температура электродвигателя, °С; вибрация насоса по оси X , м/с^2 ; вибрация насоса по оси Y , м/с^2 .

Источником информации по всем перечисленным параметрам являются телеметрические датчики системы мониторинга, сигналы от которых фиксируются в виде поминутных значений.

В качестве примера анализа временных рядов рассмотрим данные вибрации насоса по оси Y . На рис. 1 представлен временной ряд, по оси абсцисс которого размещены даты получения данных, а по оси ординат – значения показателя вибрации.

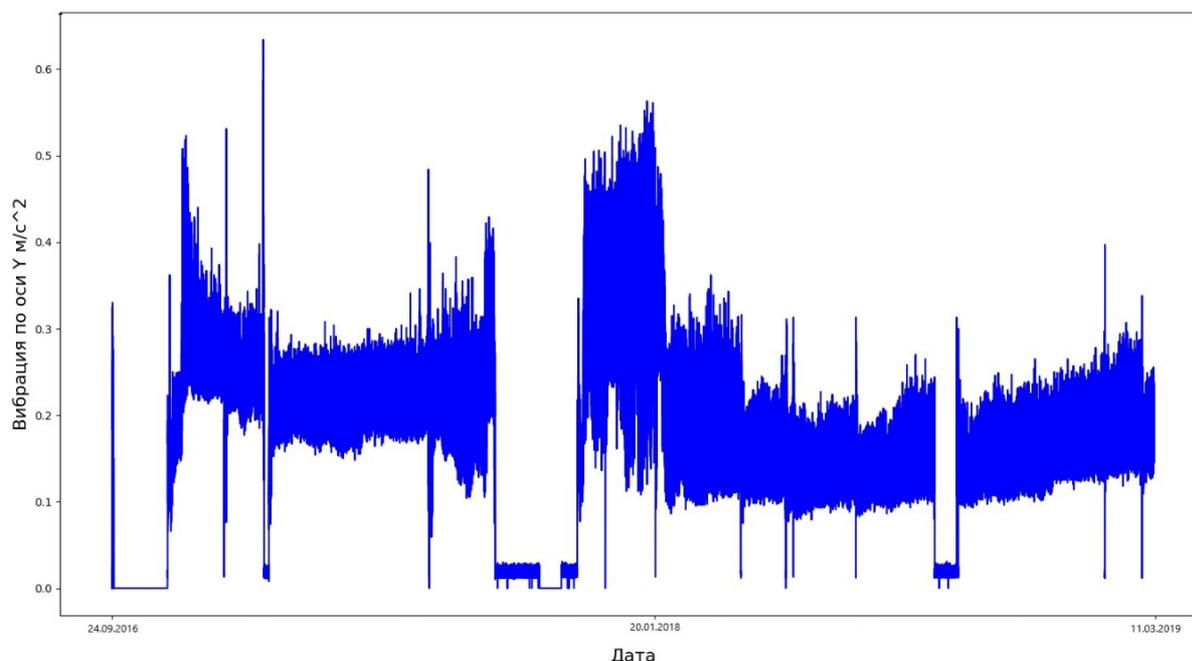


Рис. 1. График вибрации насоса по оси Y (по минутные данные)
Fig. 1. Y-axis pump vibration graph (minute data)

Анализируя исходные данные, можно сделать вывод, что насос выключали на месяц в 2016 г., на полтора месяца в 2017 г. и на неделю в конце 2018 г. Факт выключения также подтверждают данные, отображающие напряжение сети с аналогичных участков времени. Можно заметить, что после включения ЭЦН имеет другой режим работы, что обусловлено пиками в значениях вибрации, сразу после моментов выключения.

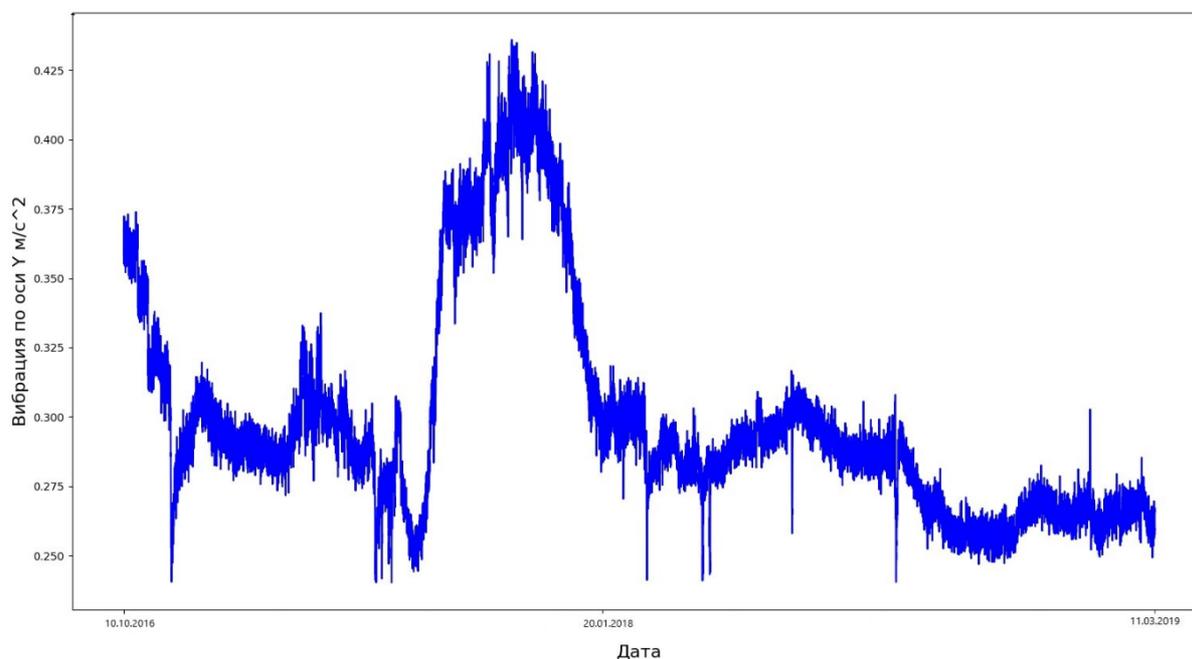


Рис. 2. Обработанный временной ряд данных вибрации насоса по оси Y (почасовые данные)
Fig. 2. Processed time series of pump vibration data in Y-axis (hourly data)

В процессе исследования исходных данных было принято решение убрать из обучающей выборки места, где фазное напряжение равнялось нулю, и очистить выборку от пиков, которые явно выбиваются из нормального режима работы. Одним из преобразований данных было уменьшение

размерности выборки за счет усреднения значений по часам. При получении значений, которые описывали работу насоса за следующие сутки, требовалось предсказать 1440 значений, а при усреднении данных по часам требовалось найти 24 значения. Уменьшение количества предсказанных значений позволит уменьшить ошибку на длительные промежутки времени. Результаты преобразований представлены на рис. 2.

Нейросетевое моделирование

По оценке автора работы [9] наиболее популярными и широко используемыми являются классы авторегрессионных и нейросетевых моделей прогнозирования. Авторегрессионные методы наподобие ARIMA [10] и его модификаций требуют определения множества подгоночных параметров, процедура определения которых не является однозначной. Кроме того, данные методы не обладают нужной степенью гибкости.

Наиболее гибкими к характеру временных рядов являются модели, основанные на ИНС. Среди моделей данного типа в приложениях к задачам прогноза выделяют глубокие сети LSTM. В работах [11–14] показана эффективность сети LSTM в задаче прогнозирования добычи нефти по сравнению с традиционными методами. LSTM оказалась точнее модели ARIMA на 8–37 % на разных месторождениях в Китае и Индии. По сравнению с модификацией метода анализа кривой спада (DCA), широко используемого в нефтяной промышленности, LSTM оказалась точнее на 17–29 %.

Поэтому в настоящей работе в качестве основного метода прогнозирования состояния ЭЦН был выбран метод нейросетевого моделирования. Причем в качестве искусственной нейронной сети (ИНС) была выбрана сеть LSTM. Данная сеть – современная рекуррентная ИНС, способная обучаться долгосрочным зависимостям и длительное время сохранять контекст исторических данных [15,16].

Были проведены исследования возможности прогнозирования нейросетей LSTM на короткий период времени (до 3 сут). Для обучения нейросети использовались данные вибрации насоса по оси Y в период с 24.09.2016 по 11.03.2019. Размер обучающего множества равнялся 18 425 элементам. Точность нейросетевой модели оценивалась при помощи показателя «Средняя абсолютная ошибка в процентах», формула для вычисления которого имеет вид

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{|Z(t) - \hat{Z}(t)|}{Z(t)} \cdot 100 \%,$$

где N – количество отсчетов ряда; t – дискретное время; $Z(t)$ – значения исходного ряда; $\hat{Z}(t)$ – предсказанные значения.

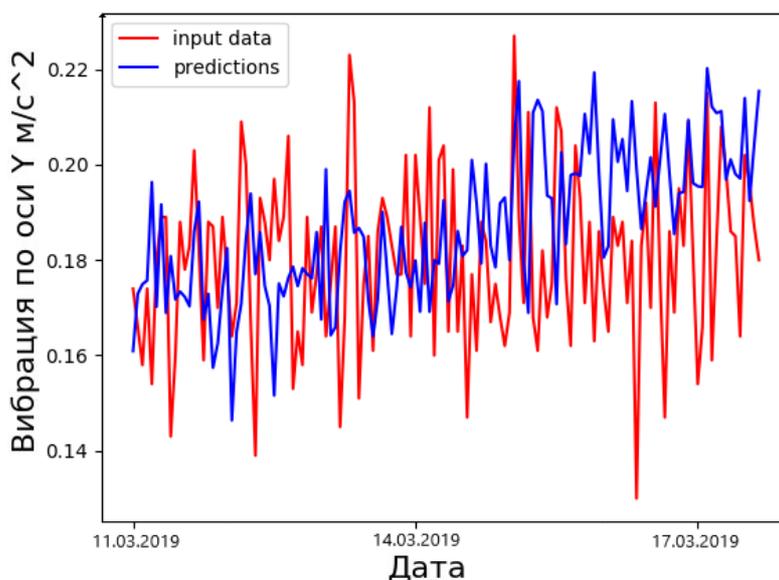


Рис. 3. Прогнозирование временного ряда на следующие 135 значений
Fig. 3. Forecasting a time series for the next 135 values

На рис. 3 приведен предсказанный временной ряд из значений вибрации насоса примерно на 5 сут (с 11.03.2019 по 17.03.2019). Для предсказания использовались 12 значений из исходных

данных в виде временного окна, которое сдвигалось на каждом шаге на одно значение, при этом каждый раз добавлялось значение, предсказанное нейронной сетью. Прогнозировались следующие 135 почасовых значений вибрации насоса. Процент средней ошибки обученной сети на всем исследованном интервале времени (МАРЕ) составил 11,23 %. На рис. 3 обозначены: input data – реальные данные о вибрации, полученные с датчика, а predictions – данные, предсказанные сетью. Видно, что с ростом интервала предсказания ошибка растет и в конце интервала достигает 30 %.

Для повышения точности прогноза было увеличено количества эпох в полтора раза и количество итераций в одной эпохе при обучении нейросети, таким образом количество эпох составило 1500, а количество итераций в каждой эпохе – 500. Для обучения также использовалось скользящее окно в 12 значений, выход у сети равнялся одному значению. Для предсказания использовались 12 значений из исходных данных, временное окно сдвигалось на каждом шаге на одно значение, при этом каждый раз добавлялось значение, полученное нейронной сетью. Прогнозировались следующие 135 значений. Процент средней ошибки при тестировании (МАРЕ) составил 10,34 %. На рис. 4 обозначения: input data – исходные данные, predictions – данные, предсказанные сетью.

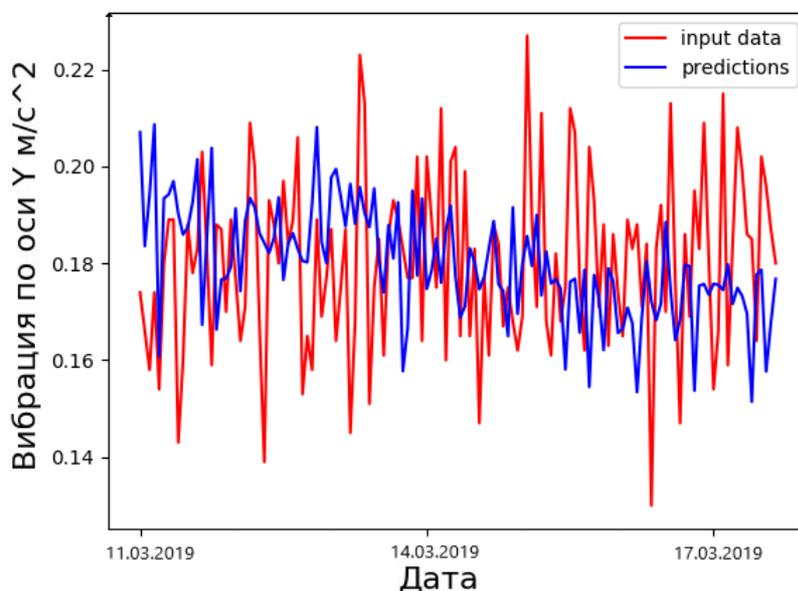


Рис. 4. Прогнозирование временного ряда на следующие 135 значений
Fig. 4. Forecasting a time series for the next 135 values

Из рис. 4 видно, что на всем интервале прогноза точность повысилась, но максимальные отклонения результатов могли достигать 20 %, что вряд ли допустимо при прогнозировании поломок в реальном времени.

Поэтому были проведены дополнительные исследования по обучению нейросетей и повышению точности прогноза. Для этого была изменена архитектура нейросети и уменьшен период прогноза до 3 сут. Рассматривались 2 варианта обучения. Обучение в обоих случаях производилось на видеокарте nvidia gtx 1080 ti, процессор Intel Core i7, оперативной памяти 16gb. Для первого варианта обучение заняло 4 ч (12 с на одну эпоху). Для второго варианта время обучения составило 11 ч (26 с на эпоху).

При первом варианте обучение осуществлялось на 1100 эпохах, а количество итераций в одной эпохе – 200. Получили следующую функцию обратного распространения ошибки (рис. 5), где по оси абсцисс показан номер эпохи, а по оси ординат – значение функции ошибки. Для обучения также использовалось скользящее окно в 12 значений, выход у сети равнялся одному почасовому значению вибрации насоса. На рис. 5 синим цветом показан график ошибки при обучении, а красным – при валидации.

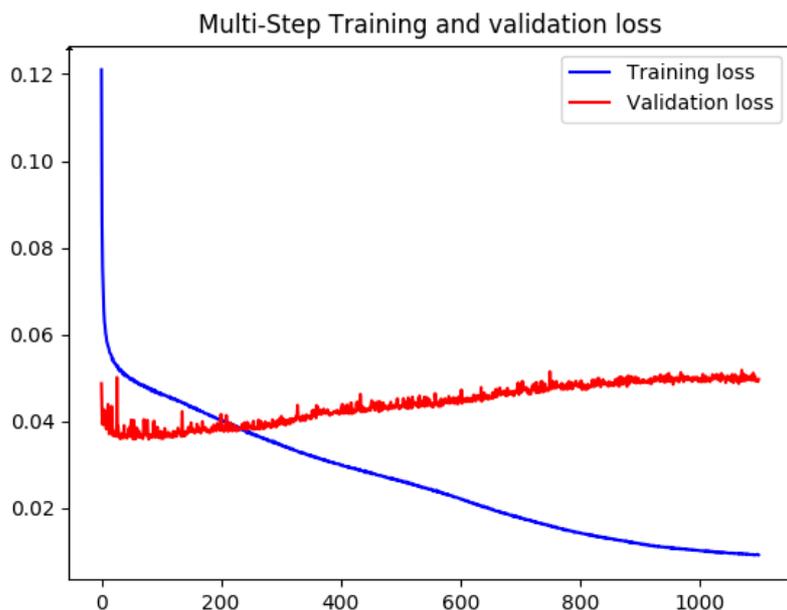


Рис. 5. Функция обратного распространения ошибки
Fig. 5. Backpropagation function

На рис. 6 представлен предсказанный временной ряд. Процент средней ошибки на всем временном интервале (MAPE) составил 2,79 %. На рис. 6 приняты следующие обозначения: input data – исходные данные, predictions – данные, предсказанные сетью. На рис. 6 также показаны предсказанные тренды (линейный – сиреневый цвет и нелинейный – зеленый цвет).

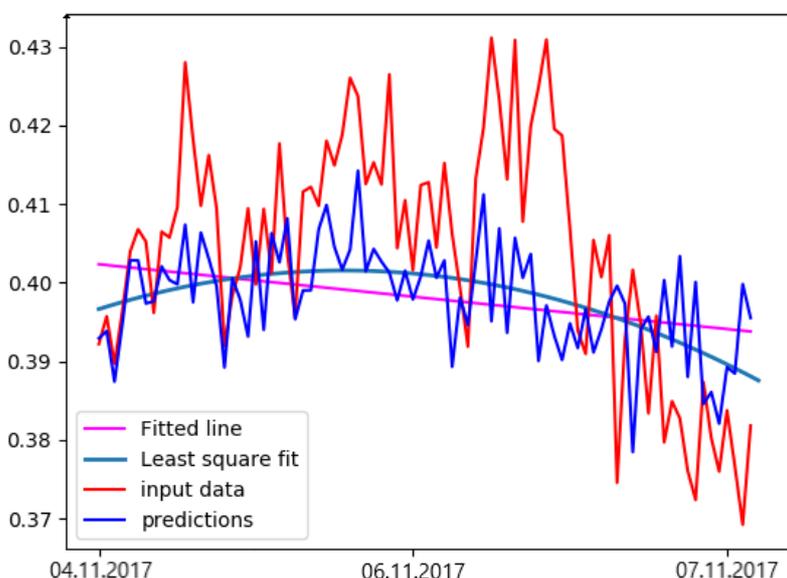


Рис. 6. Прогнозирование временного ряда на следующие 84 значения
Fig. 6. Forecasting the time series for the next 84 values

Из рис. 6 видно, что нелинейный тренд предсказан достаточно точно, но предсказанные значения вибрации в некоторых точках сильно отличаются от реальных.

Поэтому был рассмотрен второй вариант обучения с увеличенным числом итераций до 500 на каждой эпохе, количество которых также было увеличено до 1500.

Обученная нейросеть показывает неплохие результаты прогноза, приведенные на рис. 7. Процент средней по всему временному интервалу ошибки (Test MAPE) составил всего 2,54 %. На рис. 7: input data – исходные данные, predictions – данные, полученные сетью. Также на рис. 7 приведены графики линейного и нелинейного трендов.

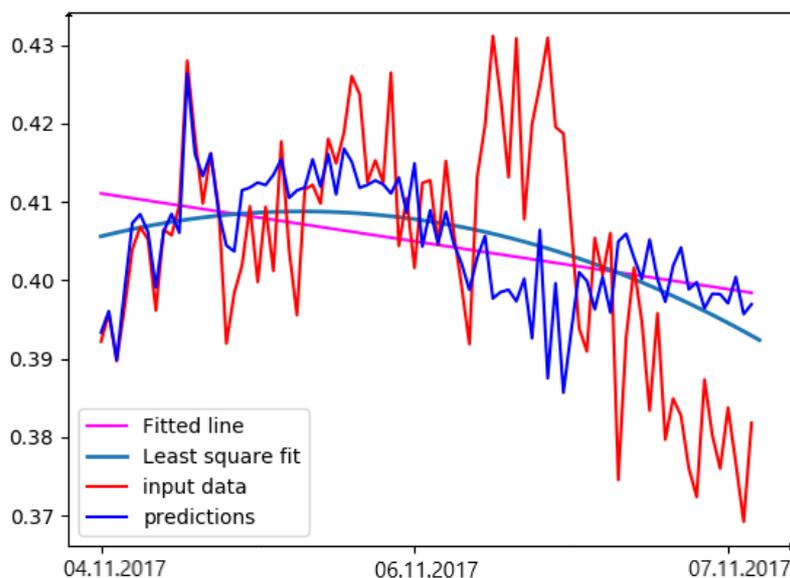


Рис. 7. Прогнозирование временного ряда на 3 суток
 Fig. 7. Forecasting the time series for 3 days

Из рис. 8 видно, обученная нейросеть практически точно предсказывает значения вибрации в первые 12 ч времени (среднее отклонение прогнозного значения от реального составляет менее 0,5 %), что является очень хорошим результатом для нейросети.

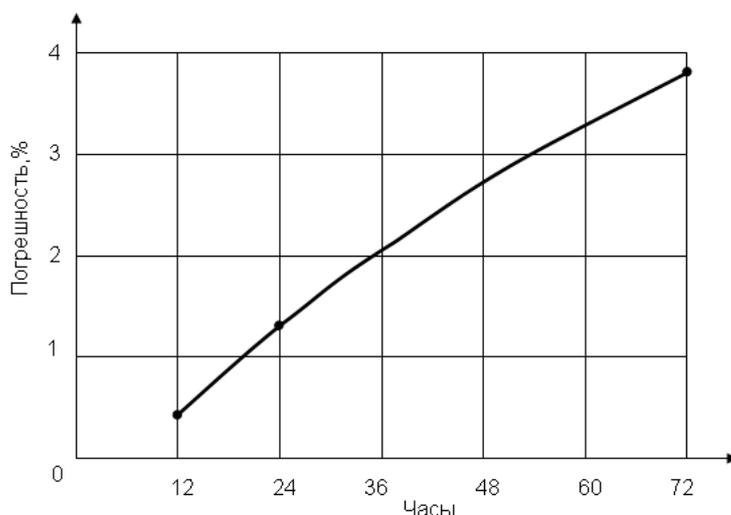


Рис. 8. Изменение средней ошибки на временном интервале прогноза
 Fig. 8. Change in the average error over the forecast time interval

Дальше погрешность растет и достигает 4 % в конце интервала прогноза, что видно из рис. 8. Данный результат можно считать приемлемым по точности прогноза на первые сутки, но обученные сети требуют больших затрат времени.

Заключение

В результате проведенных исследований был опробован метод прогнозирования вибрации электроцентробежного насоса при помощи искусственных нейронных сетей. Анализ результатов показал, что процент ошибки довольно высок для точного прогнозирования значений, но при этом нейросети хорошо улавливают тренд внутри временного ряда, что говорит о возможности применения нейросетей совместно с экспертной системой, основанной на знаниях экспертов, представленных в виде набора правил. Определение тренда позволит экспертной системе более точно спрогнозировать поведение оборудования и за счет этого уменьшить затраты на его обслуживание.

Литература

1. Camilleri, L.A.P. How 24/7 Real-Time Surveillance Increases ESP Run Life and Uptime / L.A.P. Camilleri, J. Macdonald // *Society of Petroleum Engineers*. – 2010, January 1. DOI: 10.2118/134702-MS
2. Истомин, Д.А. Экспертная система оценки технического состояния узлов электроцентробежных насосов на основе продукционного представления знаний и нечеткой логики / Д.А. Истомин, В.Ю. Столбов, Д.Н. Платон // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 133–143. DOI: 10.14529/ctcr200113
3. Application of a Fuzzy Expert System to Analyze and Anticipate ESP Failure Modes / D. Grasian, M. Bahatem, T. Scott, D. Olsen // *Society of Petroleum Engineers*. – 2017, November 13. DOI: 10.2118/188305-MS
4. Orchard, B. FuzzyCLIPS Version 6.10 d User's Guide / B. Orchard. – National Research Council of Canada, 2004. – 82 p.
5. Riley, Gary. CLIPS: A Tool for Building Expert Systems [online] / Gary Riley. – GHG Corporation, 2001. – <http://www.ghg.net/clips/CLIPS.html> (дата обращения: 19.04.2001).
6. Yan, Yu. Hands-On Data Science with Anaconda: Utilize the right mix of tools to create high-performance data science applications / Yu. Yan, J. Yan. – Packt Publishing-ebooks Account, 2018. – 364 p.
7. Брускин, С.Н. Модели и инструменты предиктивной аналитики для цифровой корпорации / С.Н. Брускин // *Вестник РЭУ им. Г.В. Плеханова*. – 2017. – № 5. – С. 136–139.
8. Умная платформа / А. Скобеев, Д. Маганов, В. Рогод и др. – 2019. – <https://hbr-russia.ru/innovatsii/tekhnologii/803089> (дата обращения: 11.06.2020).
9. Чучуева, И.А. Модель прогнозирования временных рядов по выборке максимального подбора: дис. ... канд. техн. наук / И.А. Чучуева. – М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2012.
10. Spatial Bayesian Network for predicting sea level rise induced coastal erosion in a small Pacific Island / O. Sahin, R.A. Stewart, G. Faivre et al. // *Journal of Environmental Management*. – May 15 2019. – Vol. 238. – P. 341–351. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.03.008
11. Bretherton, F.P. A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73 / F.P. Bretherton, R.E. Davis, C. Fandry // *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. – Elsevier, 1976. – Vol. 23, no. 7. – P. 559–582.
12. Tealab, A. Time series forecasting using artificial neural networks methodologies: A systematic review / A. Tealab // *Future Computing and Informatics Journal*. – 2018. – Vol. 3, no. 2. – p. 334–340.
13. George, E.P. Box and Gwilym M. Jenkins Time series analysis forecasting and control / E.P. George. – San Francisco: Holden-Day, 1970. – 553 p.
14. Sagheer, A. Time series forecasting of petroleum production using deep LSTM recurrent networks / A. Sagheer, M. Kotb // *Neurocomputing*. – 2019. – Vol. 323. – P. 203–213.
15. Ясницкий, Л.Н. Интеллектуальные системы / Л.Н. Ясницкий. – М.: Лаборатория знаний, 2016. – 221 с.
16. Hochreiter, S. Long short-term memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // *Neural Computation: journal*. – 1997. – Vol. 9, no. 8. – P. 1735–1780.

Каракулов Игорь Владимирович, аспирант кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь; karakuloviv@yandex.ru.

Клюев Андрей Владимирович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь; kav@gelicon.biz.

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.

Поступила в редакцию 25 сентября 2020 г.

PREDICTING THE TECHNICAL CONDITION OF AN ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMP BASED ON NEURAL NETWORK MODELING

I.V. Karakulov, karakuloviv@yandex.ru,

A.V. Kluiev, kav@gelicon.biz,

V.Yu. Stolbov, valeriy.stolbov@gmail.com

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Introduction. The problem of predicting the state of an Electric Submersible Pump during operation is considered. Downtime and shortages caused by pump failure lead to losses in oil production and require time to replace equipment. By predicting the condition of the equipment, it is possible to minimize pump maintenance costs and reduce well downtime. Expert systems and predictive analytics methods are used to analyze the state of systems. The scientific work uses methods that are based on artificial neural networks. **Purpose of research.** Elaboration of the issues of forecasting the technical condition of the pump through by using machine-learning models. **Materials and methods.** Equipment failure forecasting is carried out using time series analysis. The data was obtained from telemetric sensors of the monitoring system installed on an electric submersible pump. The initial data were taken at one-minute intervals. Initial data preprocessing was carried out. The data was cleared of values (peaks) that are clearly got out of normal operation and places where the phase voltage was equal to zero were removed. An artificial neural network with the LSTM neuron type is used to predict time series. Time series forecasting was carried out for five days. Evaluating system parameters over long periods allows you to assess the condition of its components and prevent equipment failure. **Results.** The possibilities of neural networks trained on the basis of data from telemetric sensors of the monitoring system for predicting the values of vertical vibration of the pump are investigated. The use of a neural network model in the form of LSTM, which has shown good results in the analysis of time series, is justified. It was found that neural networks capture the trend well within the time series, which indicates the possibility of using it together with the expert system. **Conclusion.** The proposed methods and models are tested on real data, which confirms the possibility of their use in the development of an intelligent information system for managing the technical condition of an Electric Submersible Pump during operation.

Keywords: Electric Submersible Pump, forecasting, time series, artificial neural network, estimation of forecasting accuracy, LSTM network.

References

1. Camilleri L.A.P., Macdonald J. How 24/7 Real-Time Surveillance Increases ESP Run Life and Uptime. *Society of Petroleum Engineers*, 2010, January 1. DOI: 10.2118/134702-MS
2. Istomin D.A., Stolbov V.Yu., Platon D.N. Expert System for Assessment of Technical Condition of Electric Centrifugal Pump Assemblies Based on Productive Presentation of Knowledge and Fuzzy Logic. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 133–143. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200113
3. Grassian D., Bahatem M., Scott T., Olsen D. Application of a Fuzzy Expert System to Analyze and Anticipate ESP Failure Modes. *Society of Petroleum Engineers*, 2017, November 13. DOI: 10.2118/188305-MS
4. Orchard B. *FuzzyCLIPS Version 6.10 d User's Guide*. National Research Council of Canada, 2004. 82 p.
5. Riley G. CLIPS: A Tool for Building Expert Systems [online]. GHG Corporation, 2001. Available at: <http://www.ghg.net/clips/CLIPS.html> (accessed 19 April 2001).
6. Yan Yu., Yan J. *Hands-On Data Science with Anaconda: Utilize the Right Mix of Tools to Create High-Performance Data Science Applications*. Packt Publishing-ebooks Account, 2018. 364 p.
7. Bruskin S.N. Models and Tools of Predicting Analytical Research for Digital Corporation. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*, 2017, no. 5, pp. 135–139. (in Russ.)

8. Skobeev A., Maganov D., Roodny V. *Umnaya platforma*. [Smart platform]. Available at: <https://hbr-russia.ru/innovatsii/tekhnologii/803089> (accessed 11.06.2020).

9. Chuchueva I.A. *Model' prognozirovaniia vremennykh riadov po vyborke maksimal'nogo podobii*. *Dis. kand. tekhn. nauk* [Time series prediction model for maximum similarity sample. Cand. Sci. Diss.]. Moscow, 2012. 155 p.

10. Sahin O., Stewart R.A., Faivre G., Ware D., Tomlinson R., Mackey B. Spatial Bayesian Network for Predicting Sea Level Rise Induced Coastal Erosion in a Small Pacific Island. *Journal of Environmental Management*, 2019, vol. 238, pp. 341–351. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.03.008

11. Bretherton F.P., Davis R.E., Fandry C. A Technique for Objective Analysis and Design of Oceanographic Experiments Applied to MODE-73. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1976, vol. 23, no. 7, pp. 559–582.

12. Tealab A. Time Series Forecasting Using Artificial Neural Networks Methodologies: A Systematic Review. *Future Computing and Informatics Journal*, 2018, vol. 3, no. 2, pp. 334–340.

13. George E., Box P., Gwilym M. *Jenkins Time Series Analysis Forecasting and Control*. San Francisco, Holden-Day, 1970. 553 p.

14. Sagheer A., Kotb M. Time Series Forecasting of Petroleum Production Using Deep LSTM Recurrent Networks. *Neurocomputing*, 2019, vol. 323, pp. 203–213.

15. Yasnitsky L.N. *Intellektual'nyye sistemy* [Intelligent Systems]. Moscow, Laboratoriya znaniy Publ., 2016. 221 p.

16. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. *Neural Computation: journal*, 1997, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780.

Received 25 September 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Каракулов, И.В. Прогнозирование технического состояния электроцентробежного насоса на основе нейросетевого моделирования / И.В. Каракулов, А.В. Клюев, В.Ю. Столбов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 37–46. DOI: 10.14529/ctcr200404

FOR CITATION

Karakulov I.V., Kluiev A.V., Stolbov V.Yu. Predicting the Technical Condition of an Electric Submersible Pump Based on Neural Network Modeling. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 37–46. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200404

DEVELOPMENT OF A MINING SIMULATION MODEL FOR POTASSIUM ORE MINING PLANNING

A.V. Zatonkiy¹, z xenon@narod.ru,

P.A. Yazev², yazev1988@gmail.com

¹ Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Perm region, Russian Federation,

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Introduction. In this article, we show the importance of potash fertilizers produced by PJSC Uralkali, Berezniki, Perm Territory for agriculture and the economy in general. A process of potassium ore underground mining is described from breaking up moment till transportation to the surface. An importance of production planning for the mining enterprise functioning is substantiated. Various levels of planning, from a general production plan to a weekly and daily plans are described. The problem of such planning at PJSC Uralkali is in using only integral performance indicators, it leads to significant errors. It is proposed to use simulation modeling as a possible solution to the problem. **Purpose of work.** The purpose of this work is to develop a simulation model of mining operations, from the process of breaking and transporting ore to a conveyor-transport system, and to test model's applicability for ore mining planning. Since the existing software has a number of limitations in applies to potash mines, a specialized object-oriented library allows modeling queuing systems, multi-agent and active systems is used as a basis for modeling. The limitations and assumptions of the model are described. **Materials and methods.** The model is igned as a deterministic automaton. The end point for ore mining process modeling is the transfer of ore to the unloading point, because further transportation of ore is not a limiting factor for mining. **Conclusion.** The special states of all objects of the system including mining combine – self-propelled car – unloading point and all possible transitions between them are described. A data from open sources is taken to check the adequacy of the model. Changes in the simulation results are investigated for various input parameters in the developed software. The simulation results are of a pulsating character due to the periodic execution of the harvester drive away. A productivity of the combine decreases with an increase in the distance traveled by a self-propelled car. The possibility of transition to a stochastic model is investigated. An expected decrease due to an increase in the downtime of the combine is shown. A conclusion about the applicability of the model to improve the quality of planning for underground potassium ore mining is made based on obtained data.

Keywords: potash ore, mining machine, modeling, planning, object-oriented library, adequacy research, output pulsation, deterministic model, stochastic model.

Introduction

Potash fertilizers have great importance for world agriculture, increasing yields storability and resistance of plants to diseases. Three countries, including Russia have more than 80% of potash ore reserves. Ore reserves and finished products made in Russia take the second place in the world after Canadian products Verkhnekamsk potash ore deposit is developed by PJSC Uralkali (Berezniki town, Perm Region). Uralkali's potassium chloride reserves are more than 20% of world's reserves.

The most important stage of the production chain is the extraction of ore (halite, sylvinit and carnallite). The ore is mined underground; the depths of the mines are from 200 to 450 meters. The mine rock is both a source of useful materials and a building material to ensure the stability of an ore-breaking floor. The mining is performed in underground blocks by a special underground mining machine. The mining machine loads mined ore into the storage hopper with a capacity of 15 to 25 tons during the operation. The ore is carried from the mining machine to the conveyor-transport system by self-moving cars. The conveyor-transport system aim is the transportation of the ore to shafts. Further the ore is elevated to the surface by skip winder located in the mine shafts.

The long-term plan is usually created for the entire period of deposit exploitation and other plans (annual, monthly and weekly-daily) are based on it [1]. The annual plan is the most important, and a crucial stage of the plan is designed using a block model of the deposit and all known geological

information of the blocks. The monthly plan is a more detailed because of geophysical testing using then an annual plan, and a weekly-daily plan is the latest and takes into account schedules of repairs, equipment maintenances and workers jobs [1, 2]. Deterministic resource models are typically used to improve the accuracy of mining plans for each mining machine by estimating an ore content in blocks and average values for geological variables, but assumptions of them lead to big errors in planning [3, 4].

A simulation modeling is one of the ways to refine production plans and it has found application in a wide range of studies. The mining process can be considered as a queuing system (QS) with random distributions of operations times, or as an automaton with the assumption that all planned actions are performed just in time, and emergencies do not arise. The existing mine simulation models focus on coal and nickel mines and cannot be applied for potash mines due to specific ore composition [5–9]. The paper [10] is devoted to the potash industry but focuses on ore transportation issues. Therefore, it seems relevant to develop a new simulation model for mining operations planning.

Materials and methods

A simulation model software implementation was created using an object-oriented library developed at the Automation of Technological Processes Department of Berezniki Branch of Perm National Research Polytechnic University. This library allows to simulate complex and multiply connected queuing systems, active, multi-agent systems and deterministic automatons as a particular case of the QS [11]. We consider only a mining operations modeling from the mining machine to an unloading point because a conveyor-transport system has no limitations as an assumption [12].

For a model creation we have to describe all special states of the system “mining machine – self-propelling car – unloading point” and all possible transitions between them. For example, a “mining machine” object has sixteen states [13]:

1. An ore breaking. The mining machine performs this action from the point where the ore breaking can be started (the beginning of a new stope or partially completed stope continuation) and the storage hopper has an available free space. Ore breaking every time is performed till a user-specified length, and other mining machine could continue it till a new user-specified length.
2. An ore loading from the storage hopper into the self-propelled car is performed when the hopper is full, and the self-propelled car is ready for ore reception and is placed near the mining machine.
3. A mining machine reverse moving is performed after ore breaking ending.
4. A long-term periodic maintenance is carried out after specific time from a previous analogical maintenance, and the mining machine has to be placed at the output of the stope.
5. A passage of the mining machine is transfer from one local place of work to another.
6. A begin of stope mining is driving with a variable cut area from a transportation corridor.
7. An electrical generator transition is performed periodically or according to a user-specified schedule.
8. A downtime of the mining machine for maintenance or change of a staff is performed by a schedule.
9. A transfer of a fan is performed at a certain mining machine distance from a previous fan disposition.
10. A timbering installation is performed at a certain distance from the previous timbering position or at a place of geological deformation (the last one cannot be modeled with assumptions about the deterministic model).
11. A ventilating pipe extending is performed when the mining machine reaches a certain distance from the previous ventilating pipe extending point.
12. An anchor transfer is performed when the mining machine reaches a certain distance from the previous anchor transfer point.
13. A drilling of degasification wells (by short-hole and long-hole methods) is performed when the mining machine reaches a certain distance from the previous point according to a chart of working and type of mining machine.
14. An extension of the power supply wires is performed when the mining machine reaches a maximum distance from electrical generator. Fuel and lubricant storages can be transferred at the same time.
15. A mine surveyor's mark installation or replacement is performed when the mining machine reaches a certain distance from the previous mark.
16. A downtime of mining machine because waiting for the self-propelled car. This unintended idle state occurs when the mining machine reaches such a distance from the unloading point so the car has no time to return before the hopper will full of ore. Mining companies aim is to decrease downtime of the mining machine by changing the stope length and other factors.

Objects “Self-propelled car” and “unloading point” have six and three states respectively. Fig. 1 is the visual demonstration of all special states and all transitions between them.

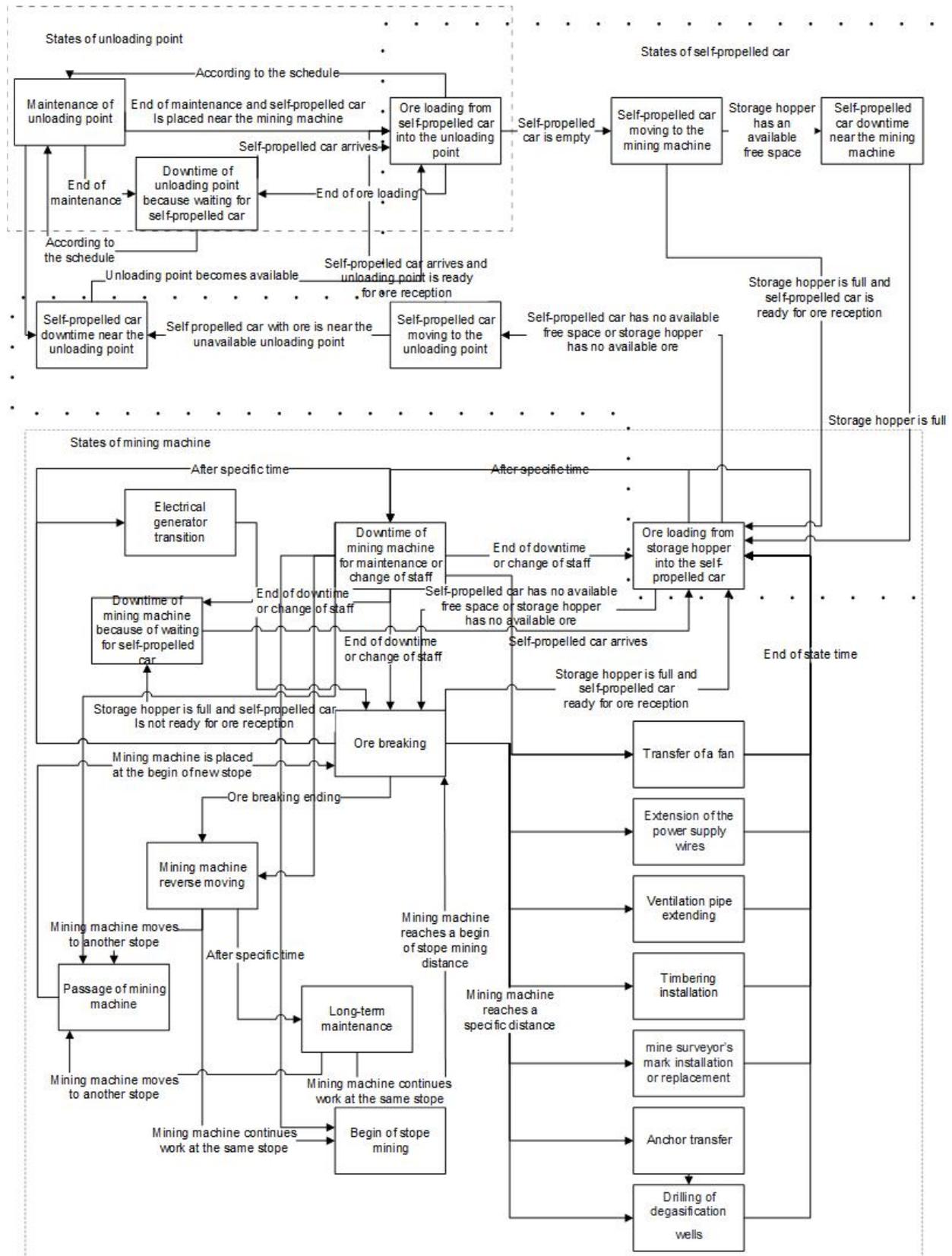


Fig. 1. Scheme of special states and transitions between them

Result and discussion

The model is equipped by the data from open sources about an ore density, a mining machines Ural-20R technical specification, physical parameters in blocks, average times of technological operations and the intervals between them [7]. A validation of the model for adequacy and operability was made by investigating of model responses to changes of parameters. For example, the percentage of ore breaking time should decrease when a distance to unloading point grows because of the mining machine has to wait more time for the self-propelled car return. A first experiment was carried out when the unloading point located at distance of 50 meters from the entrance of the stope. Each unload point served 20 self-propelled cars from 20 mining machines; the aim of testing is a study of a queue growth. A self-propelled car carriage waiting time is increased for each mining machine as expected (Fig. 2). Salient points on the graph are relevant to mining machine movement between pairs of oppositely located stopes.

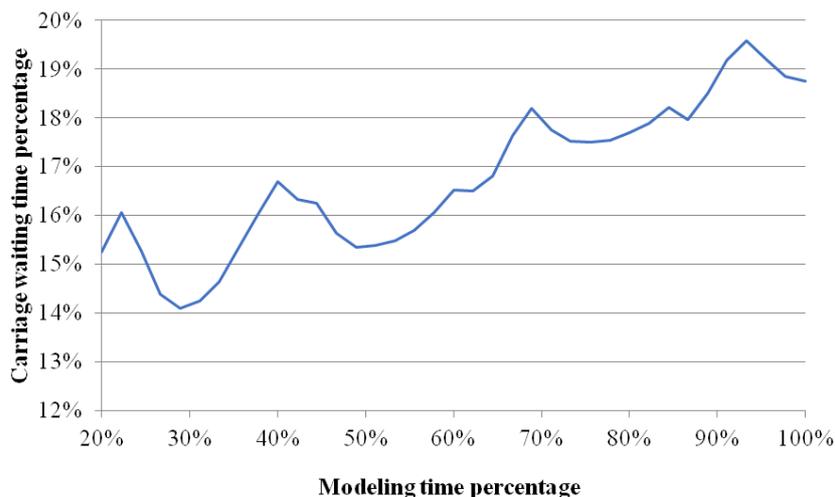


Fig. 2. Dependence between carriage waiting time and modeling time

The graph shows that the productive time of the mining machine is more at the stope begin in a compare with the machine moves farther from the starting point of mining, and self-propelled car distance for carriage grows. Later the production time is stabilized at the same level and further pulsations are explained by the passages of the mining machine and the performing of mandatory operations without carriage waiting.

The influence of the distance from the beginning of the stope to unloading point on the self-propelled carriage waiting time was studied. It is obviously that waiting time should increase due to passage increase. This assumption is confirmed by experimental results (Fig. 3).

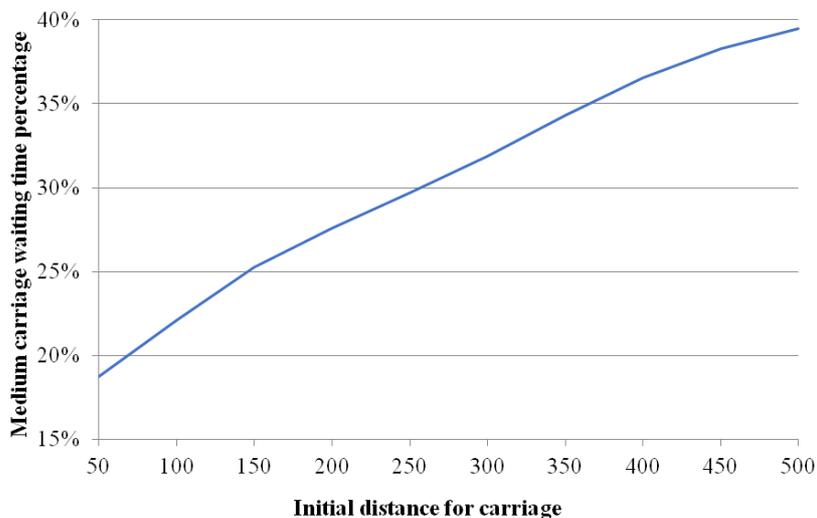


Fig. 3. Dependence between carriage waiting time and distance for carriage

When the unloading point is moved away from the beginning of the stope, the productive time of the mining machine decreases in accordance with the growing of mandatory operations and idles.

The queuing system performance decreases if stochastic delay appears, especially with a uniform statistical distribution of random numbers [14, 15].

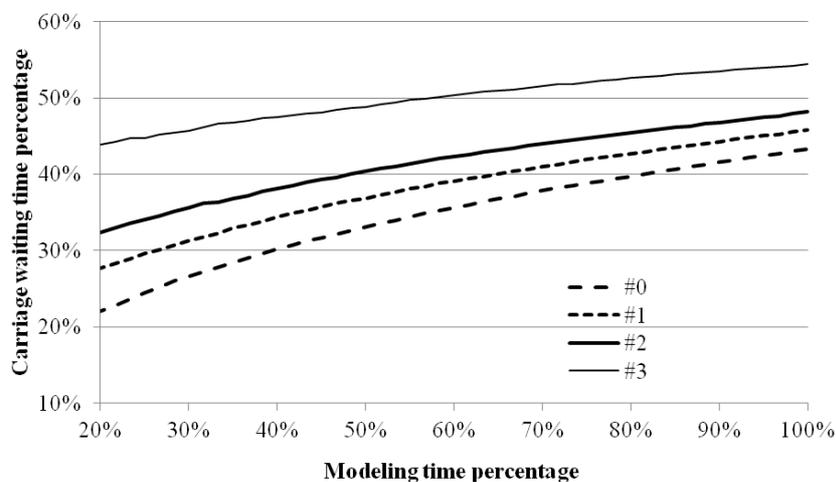


Fig. 4. Growth of carriage waiting time due to stochastic additional delay of carriage: #0 – no delay, #1 – delay is 0–1 min, #2 – delay is 0–3 min, #3 – delay is 0–5 min

The following experiment shows that model adequately responds to self-propelled car passage time changes (for example, due to unloading queues, interference with movement, etc.) by growing the carriage waiting time (Fig. 4).

Conclusion

Thus, the model of underground mining operations is enough adequate and close to reality. It can be used for planning mining operations providing that its parameters values will be refined to the reality.

References

1. Kaputin Ju.E. *Informacionnye tehnologii planirovaniya gornyh rabot (dlja gornyh inzhenerov)* [Mining planning information technologies (for mining engineers)]. St. Petersburg, Nedra, 2004. 424 p.
2. Hustrulid W., Kuchta M. *Open Pit Mine Planning and Design*. London, Taylor & Francis/Balkema, 1995.
3. Morales N., Seguel S., Cáceres A., Jélvez E., Alarcón M. Incorporation of Geometallurgical Attributes and Geological Uncertainty into Long-Term Open-Pit Mine Planning. *Minerals*, 2019, no. 9 (2), p. 108.
4. Matamoro M.E.V., Dimitrakopoulos R. Stochastic Short-Term Mine Production Schedule Accounting for Fleet Allocation, Operational Considerations and Blending Restrictions. *European Journal of Operational Research*, 2016, vol. 255, pp. 911–921.
5. Salama A., Greberg J., Schunnesson H. The Use of Discrete Event Simulation for Underground Haulage Mining Equipment Selection. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 2014, vol. 5, no. 3, pp. 256–271.
6. Pop-Andonov G., Mirakovski D., Despotov Z. Simulation Modeling and Analyzing in Underground Haulage Systems with Arena Simulation Software. *International Virtual Journal for Science, Technics and Innovations for the IndustryMachines, Technologies, Materials*, 2012, no. 6, pp. 48–50.
7. Solov'ev V.A., Sekuncov A.I. *Razrabotka kalijnyh mestorozhdenij: Praktikum* [Development of potash deposits: Practicum]. Perm, PNRSTU Publ., 2013. 265 p.
8. O'Sullivan D., Newman A. Extraction and backfill scheduling in a complex underground mine. *Interfaces*, 2014, vol. 44 (2), pp. 204–221.
9. Lukichev S., Nagovitsyn O., Belogorodtsev O. Asystemic Approach to Solving the Mining Technology Tasks Based on Modeling its Objects and Processes. *Application of Computers and Ope-*

rations Research in the Mineral Industry Proceedings of the 38th International Symposium, 2017, pp. 29–34.

10. Chudinov G.V. *Opyt razrabotki sistemy imitacionnogo modelirovaniya gruzopotoka v kalijnyh rudnikah – PK “Rudopotok”* [Experience of Developing a System for Simulation of Cargo Traffic in Potash Mines – PC “Ore Flow”]. *Imitacionnoe modelirovanie. Teorija i praktika: Sbornik dokladov pjatoj jubilejnoj vsrossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii IMMOD-2011*. St. Petersburg, CTSS publ., 2011, vol. 2, pp. 311–315. (in Russ.)

11. Zatonckiy A.V., Ufimtseva V.N. [Development of Object Tools for Simulation and Multi-Agent Modeling of Production Processes]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika*, 2018, no. 4, pp. 56–62. (in Russ.)

12. Sobol' A.V., Pinskiy V.L. *Mehanizacija transportirovaniya kalijnyh rud* [Mechanization of Transportation of Potash Ores]. Leningrad, Himija Publ., 1973. 160 p.

13. Brusilovskij D.V., Sobol' A.V. *Mehanizacija provedeniya gornyh vyrabotok na kalijnyh rudnikah* [Mechanization of Mine Workings in Potash Mines]. Leningrad, Himija Publ., 1973. 156 p.

14. Zatonckiy A.V., Varlamova S.A., Malysheva A.V., Mjasnikov A.A. [Use of VideoGraphic Information to Refine the Dynamic Stochastic Model of the Potassium ore Flotation Process]. *Internet-zhurnal “Naukovedenie”*, 2017, vol. 9, no 2, p. 87. (in Russ.)

15. Zatonckiy A.V. Verification of Kolmogorov Equation Usability for Reproduction and Death Processes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 60–67. DOI: 10.14529/ctcr190306

Received 30 September 2020

УДК 622.6 + 004.92

DOI: 10.14529/ctcr200405

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ГОРНО-ВЫЕМОЧНЫХ РАБОТ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ДОБЫЧИ КАЛИЙНОЙ РУДЫ

А.В. Затонский¹, П.А. Язев²

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

² *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия*

Введение. Показана значимость калийных удобрений, производимых ПАО «Уралкалий», Березники, Пермский край, для сельского хозяйства и экономики в целом. Описан процесс подземной добычи калийной руды от момента его отбойки до транспортировки на поверхность. Показана важность планирования добычи для функционирования горнодобывающего предприятия. Описаны различные уровни планирования от общего плана добычи до недельно-суточного плана. Проблема такого планирования в ПАО «Уралкалий» заключается в использовании только интегральных показателей производительности, что приводит к существенной погрешности. В качестве возможного решения проблемы предлагается использовать имитационное моделирование. **Цель работы.** Целью данной работы ставится разработка имитационной модели горных работ от процесса отбойки и транспортировки руды до конвейерно-транспортной системы и проверка её применимости для планирования добычи руды. Существующее программное обеспечение имеет ряд ограничений на использование в калийных шахтах, поэтому в качестве основы моделирования использована специализированная объектно-ориентированная библиотека, позволяющая моделировать системы массового обслуживания, многоагентные и активные системы. Описываются ограничения создаваемой модели. **Материалы и методы.** Модель строится как детерминированный автомат, конечной точкой для моделирования процесса добычи руды является передача руды на точку разгрузки,

так как дальнейшая транспортировка руды не является ограничивающим фактором добычи. **Заключение.** Описаны особые состояния всех объектов системы горный комбайн – самоходный вагон – точка разгрузки и все возможные переходы между ними. Для проверки адекватности модели взяты данные из открытых источников и в разработанном программном обеспечении исследованы изменения результатов моделирования при различных входных параметрах. Результаты моделирования носят пульсирующий характер вследствие периодического выполнения отгонов и перегонов комбайна. При увеличении расстояния, которое проходит самоходный вагон, производительность комбайна снижается. Исследована возможность перехода к стохастической модели, показано ожидаемое снижение ввиду увеличения простоев комбайна. На основе полученных данных делается вывод о применимости созданной модели для улучшения качества планирования подземной добычи калийной руды.

Ключевые слова: калийная руда, горно-выемочная машина, моделирование, планирование, объектно-ориентированная библиотека, исследование адекватности, детерминированная модель, стохастическая модель.

Литература

1. Капутин, Ю.Е. Информационные технологии планирования горных работ (для горных инженеров) / Ю.Е. Капутин. – СПб.: Недра, 2004. – 424 с.
2. Hustrulid, W. *Open Pit Mine Planning and Design* / W. Hustrulid, M. Kuchta. – London: Taylor & Francis/Balkema, 1995.
3. *Incorporation of Geometallurgical Attributes and Geological Uncertainty into Long-Term Open-Pit Mine Planning* / N. Morales, S. Seguel, A. Cáceres et al. // *Minerals*. – 2019. – No. 9 (2). – P. 108.
4. Matamoro, M.E.V. *Stochastic short-term mine production schedule accounting for fleet allocation, operational considerations and blending restrictions* / M.E.V. Matamoro, R. Dimitrakopoulos // *European Journal of Operational Research*. – 2016. – Vol. 255. – P. 911–921.
5. Salama, A. *The Use of Discrete Event Simulation for Underground Haulage Mining Equipment Selection* / A. Salama, J. Greberg, H. Schunnesson // *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. – 2014. – Vol. 5, no. 3. – P. 256–271.
6. Pop-Andonov, G. *Simulation Modeling and Analyzing in Underground Haulage Systems with Arena Simulation Software* / G. Pop-Andonov, D. Mirakovski, Z. Despotov // *International Virtual Journal for Science, Technics and Innovations for the Industry Machines, Technologies, Materials*. – 2012. – No. 6. – P. 48–50.
7. Соловьев, В.А. *Разработка калийных месторождений: практикум* / В.А. Соловьев, А.И. Секунцов. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 265 с.
8. O'Sullivan, D. *Extraction and backfill scheduling in a complex underground mine* / D. O'Sullivan, A. Newman // *Interfaces*. – 2014. – Vol. 44 (2). – P. 204–221.
9. Lukichev, S. *Asystemic Approach to Solving the Mining Technology Tasks Based on Modeling its Objects and Processes* / S. Lukichev, O. Nagovitsyn, O. Belogorodtsev // *Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry Proceedings of the 38th International Symposium*. – 2017. – P. 29–34.
10. Чудинов, Г.В. *Опыт разработки системы имитационного моделирования грузопотока в калийных рудниках – ПК «Рудопоток»* / Г.В. Чудинов // *Имитационное моделирование. Теория и практика: сб. докл. пятой юбилейной всерос. науч.-практ. конф. ИММОД-2011*. – СПб.: ОАО «ЦТСС», 2011. – Т. 2. – С. 311–315.
11. Затонский, А.В. *Разработка объектных средств имитационного и многоагентного моделирования производственных процессов* / А.В. Затонский, В.Н. Уфимцева // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. – 2018. – № 4. – С. 56–62.
12. Соболев, А.В. *Механизация транспортирования калийных руд* / А.В. Соболев, В.Л. Пинский. – Л.: Химия, 1973. – 160 с.
13. Брусиловский, Д.В. *Механизация проведения горных выработок на калийных рудниках* / Д.В. Брусиловский, А.В. Соболев. – Л.: Химия, 1973. – 156 с.
14. *Использование видеографической информации для уточнения динамической стохастиче-*

ской модели процесса флотации калийной руды / А.В. Затонский, С.А. Варламова, А.В. Мальшева, А.А. Мясников // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 87.

15. Zatonkiy, A.V. Verification of Kolmogorov Equation Usability for Reproduction and Death Processes / A.V. Zatonkiy // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 60–67. DOI: 10.14529/ctcr190306

Затонский Андрей Владимирович, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники, Пермский край; zxenon@narod.ru.

Язев Павел Александрович, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь; yazev1988@gmail.com.

Поступила в редакцию 30 сентября 2020 г.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Zatonkiy, A.V. Development of a Mining Simulation Model for Potassium Ore Mining Planning / A.V. Zatonkiy, P.A. Yazev // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 47–54. DOI: 10.14529/ctcr200405

FOR CITATION

Zatonkiy A.V., Yazev P.A. Development of a Mining Simulation Model for Potassium Ore Mining Planning. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 47–54. DOI: 10.14529/ctcr200405

Инфокоммуникационные технологии и системы

DOI: 10.14529/ctcr200406

OPTO-ULTRASONIC COMMUNICATION CHANNELS

B.B. Saidov^{1,2}, *matem.1994@mail.ru*, *saidovb@susu.ru*

*V.F. Telezhkin*¹, *telezhkinvf@susu.ru*

¹ *South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,*

² *Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan*

Introduction. Ultrasound is widely used in various applications, such as monitoring the state of structures, biomedical ultrasound imaging, and information (data) transmission. Ultrasonic transceivers are one of the modern communication systems, both for short-range and remote access. Indeed, the technology of the process of transmitting information using communication channels based on ultrasonic (US) vibrations and the physical implementation of transmission using optical fiber are widely used in conditions of confidentiality of data processing. At the same time, the needs of wireless and wired communication demanded the development of more advanced applications (software, hardware solutions). In particular, new challenges have arisen requiring transceivers to have high frequency, wide bandwidth and compact size. **Aim.** Consider the “technology – opto-ultrasonic” approach used in data transmission and reception channels. This technology involves the generation of ultrasound by a pulse using the optical-acoustic effect, followed by the reception and processing of ultrasonic vibrations. Optical ultrasonic transceivers based on the photo-acoustic (US) principle of operation have great potential, in particular, to obtain the necessary: (super high) frequency of the transmitted signal; wide bandwidth (speed); ease of use as transceivers; low manufacturing cost. **Materials and methods.** Various methods of spectral analysis (Fourier and Wavelet) have been investigated to ensure the achievement of the above goal. **Results.** Compared to traditional technologies of information reception and transmission, optical ultrasonic transceivers provide high-frequency communication, wide bandwidth and compact size. **Conclusion.** The paper investigates the methods of spectral analysis (Fourier and Wavelet) and proposes, based on these studies, possible options for the implementation of optical ultrasonic transceivers that can generate ultrasonic pulses with a duration on a nanosecond scale using an ultrafast laser and receive confidential data with a high degree of security. At the same time, by combining the principle of generating photo-acoustic ultrasound with the use of optical fiber, it is possible to obtain compact and inexpensive ultrasonic transceivers.

Keywords: ultrasound, receivers and transmitters (generation) of information, data, communication channels, fiber optic, bandwidth, technology, laser ultrasound, sensors, optical-acoustic effect.

Introduction

The development of wireless high-frequency communication technology has been going on for more than 10 years, but it has not received widespread use. The leaders of the mobile markets cannot agree on a single format for the near-field communication protocol: Apple ignores this direction, and manufacturers of phones with the Android platform, on the contrary, are promoting [1, 2]. Due to the fact that the emergence of a generally accepted standard for short-range communication is now questionable, data transmission via ultrasound could be a good alternative. The advantage of this method (method) is that, in contrast to NFC (near-field communication), data transmission via ultrasound can be carried out on almost any phone, since any phone is equipped with a speaker and a microphone [3, 4]. The only thing that is necessary is that the phone processor must be able to carry out the necessary calculations. This is due to the fact that the use of the proposed method does not impose specific requirements on the technical characteristics of the phone, but is implemented at the software level. Sound wave data can be used to exchange information between phones with a wide variety of operating systems, which is especially important in the current situation of increasing differentiation of mobile platforms. Ultrasound technology can be used not only for data transmission, but also for object recognition

in space and suppression of physical carriers for undesirable information sources [5, 6]. The theory of wavelet transform is used to study the processes of processing an ultrasonic signal. Wavelet transform is a transform using functions localized both in real time and in Fourier frequency space. Basically, it is divided into two types. One type of wavelet transform is easily reversible. That is, the original signal can be recovered after being converted. For example, image compression and cleaning [7, 8]. The second type of wavelet transform is intended for signal analysis. For example, analysis and processing of ultrasonic signals. In this work, we propose a variant for implementing a communication channel with ultrasonic sensors, which combines the use of ultrasound and a method for creating optical pulses of a given duration. This improves the efficiency of information transfer compared to standard ultrasonic techniques, while providing reduced signal energy loss and maximum control over the waveforms of the ultrasonic transmitter and data receiver [9–12].

1. Statement of the problem

It is required to research and develop a new approach “opto-ultrasound” effective for use in data transmission and reception channels. This technology involves the generation of ultrasound by a pulse due to the optical-acoustic effect. Optical ultrasonic transceivers based on the photo-acoustic principle of operation have a great potential for obtaining a high frequency of the transmitted signal, a wide bandwidth (speed), ease of use as transmitters and a relatively low cost of implementation.

2. Solution of the problem. Methods and Approaches

2.1. Digital signal processing

Continuous signals are described by continuous functions of time. The instantaneous values of such signals change in time smoothly, without abrupt jumps (breaks). Many real signals are continuous. These include, for example, electrical signals in the transmission of speech, music and images [1, 4]. All signals are divided into four groups according to the way of presentation: analog, discrete, quantized and digital.

In order to start transmitting useful information using signals, it is necessary to modify the carrier frequency so that it repeats the patterns of the useful signal. This transformation is called modulation. Vibrations of various shapes (rectangular, triangular, etc.) can be used as a carrier. However, harmonic oscillations are most often used [12–14]. Depending on which of the parameters of the carrier oscillation changes, the following types of modulation are distinguished: amplitude, frequency, phase, etc. [10, 11]. Modulation with a discrete signal is called digital modulation or keying. The following types of keying are available: frequency shift keying, phase shift keying, amplitude shift keying, and quadrature amplitude shift keying. Fig. 1 shows the main characteristics of signals, spectra of modulated signals depending on the modulation parameters [13–15].

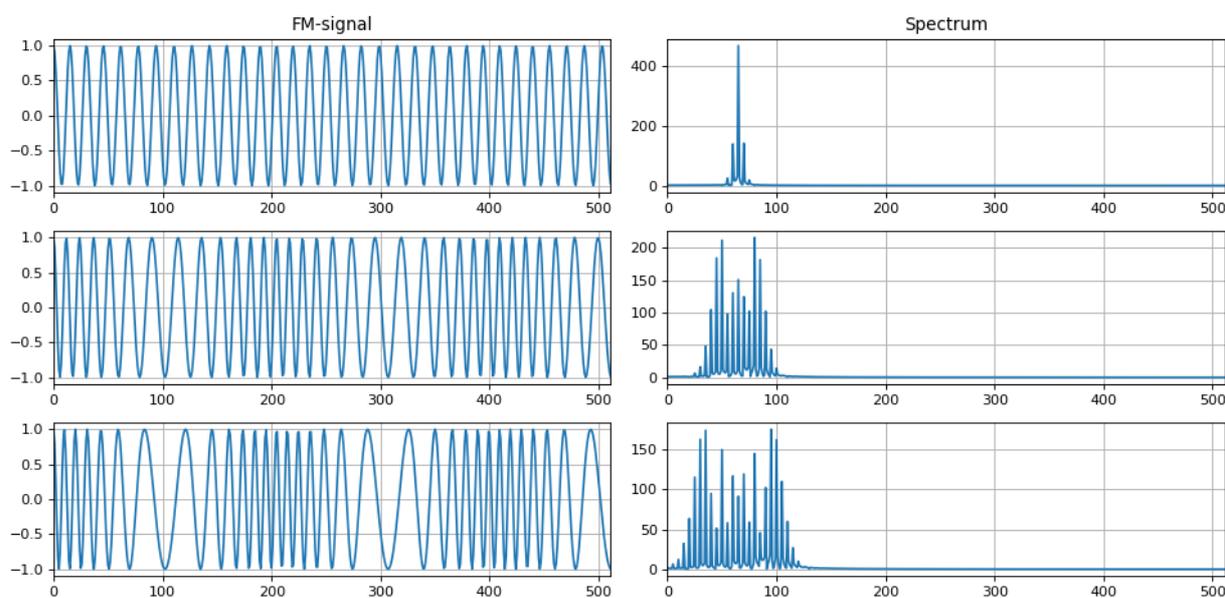


Fig. 1. Modulation of the signal and their spectrum

2.2. Wireless communication system using ultrasonic signals

This system includes a transmission module and a receiving module (Fig. 2). The transmission module receives input signals from the wireless device, modifies the received input signals so that it converts each received input signal into a corresponding ultrasonic signal, and wirelessly transmits each said ultrasonic signal through the ultrasonic channel [8, 9].

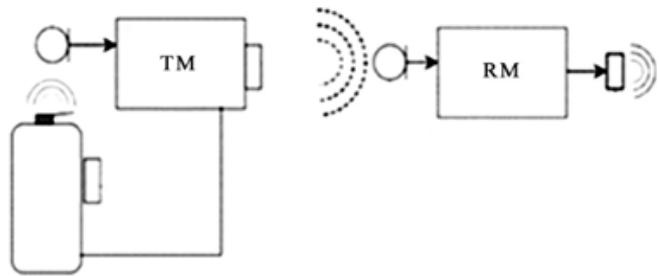


Fig. 2. Block diagram of a wireless communication system using ultrasonic signals: TM – transmission module, RM – receiving module

The receiving module (Fig. 2) receives the transmitted ultrasonic signals, reconstructs the corresponding input signals, and allows each corresponding input signal to be output through one or more output devices. Conversion of input signals can include compression, encoding, and modulation of input signals. The input signals can be voice audio signals allowing the use of a telephone call support system by providing ultrasonic communication capabilities. For example, communication between a wireless headset and a mobile phone. The transmit and receive modules can be linked to a wireless headset and a mobile phone to provide ultrasonic communication and, if necessary, radio frequency communication between them [2, 3].

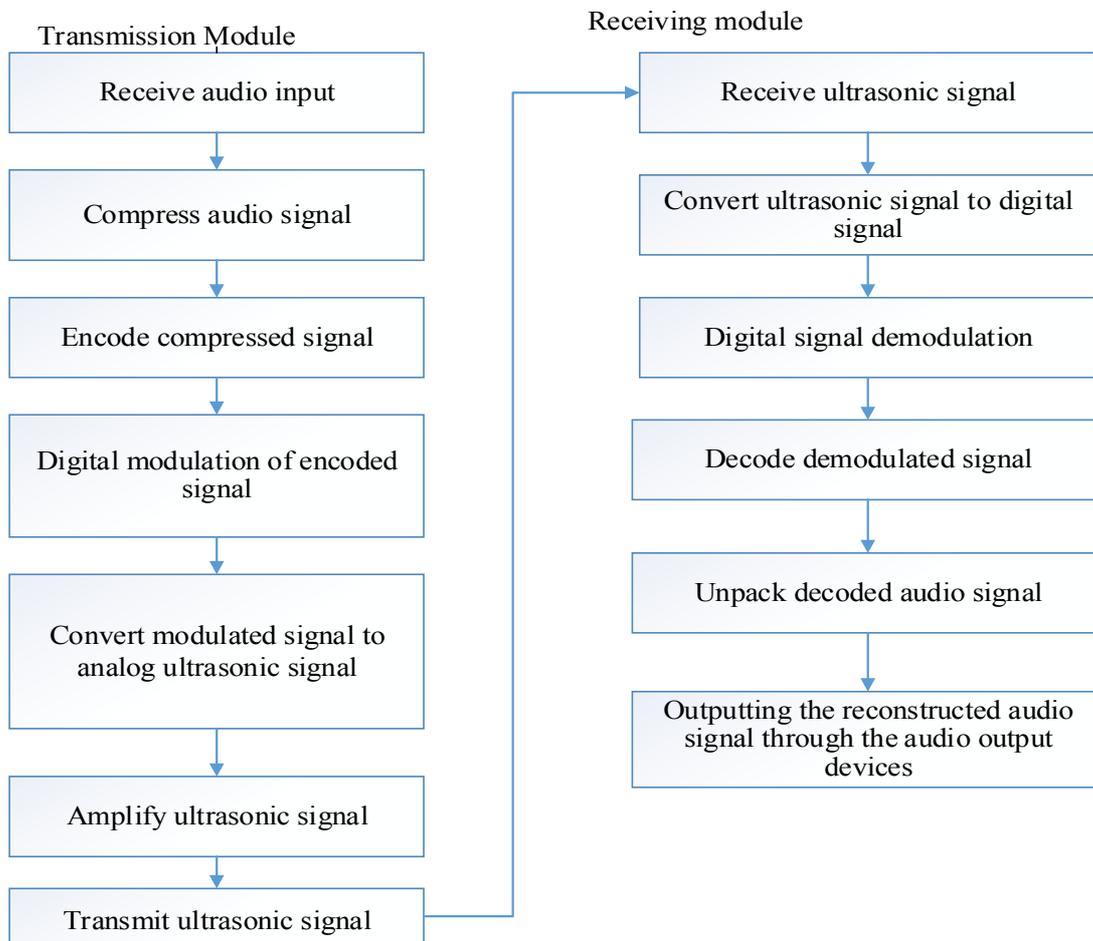


Fig. 3. Block diagram of the organization of the transmitting and receiving process of ultrasonic communication

In Fig. 3 is a block diagram based on ultrasonic communication (Fig. 2), schematically illustrating the process of ultrasonic communication between the transmitting module and the receiving module. According to this process, the transmitting module receives an input audio signal through one or more

receivers, such as a microphone, and converts the received audio signal in accordance with one or more modification methods with different conditions, which ultimately result in a corresponding ultrasonic signal. As shown in Fig. 3, the modification can include: compressing the input audio signal, encoding the compressed signal, resulting in the encoded and compressed audio signal at this stage. The encoded audio signal can then be digitally modulated in accordance with one or more modulation techniques such as single-carrier and / or multi-carrier modulation, i.e. OFDMA or CDMA modulation. This stage will allow you to move on to the digital signal, which is the input audio signal. The digital signal can then be converted to an analog ultrasonic signal, which is fed to the transducer of the transmission module to enable the transmission of the ultrasonic signal. The transmission of ultrasonic signals may be accomplished, as indicated above, by one or more acoustic output devices that can output ultrasonic signals, such as speakers, piezoelectric devices, and the like. These devices can be included as part of the transmission module or be external to it (for example, a speaker of a wireless device associated with the transmission module). The ultrasonic analog signal can be amplified for transmission by the amplifier of the transmission module.

The transmitted ultrasonic signal can be received (detected) in the receiving module, which can then reconstruct the original input audio signal with an accuracy that depends on the quality and conditions of the communication, as well as on the components and configuration of the system. Reconstruction of the input audio signal can include as shown in Fig. 3, converting the ultrasonic analog signal to a digital signal, demodulating the digital signal according to the modulation techniques used to modulate the original input signal (for example, using FMDMA-reversed or CDMA-reversed). The resulting signal can be a recovered decoded and compressed audio signal, which can then be decoded and decompressed to thereby restore the original audio signal. The reconstructed audio signal can then be output using the built-in or separate audio output device such as speaker, headset, etc.

The article proposes a variant of the implementation of a communication channel with ultrasonic sensors, which combines the use of ultrasound and a method of creating optical pulses of a given duration. This improves communication efficiency over standard ultrasonic techniques, while providing reduced signal energy loss and maximum control over the waveforms of the ultrasonic transmitter and data receiver.

2.3. Description of the opto-ultrasonic transmitter and receiver system

The block diagram shown in Fig. 4 [16] illustrates the transmission of a stream of infrared and ultrasonic signals. Microcomputers control the operation of the system. Initially, an optical pulse is transmitted from an ultrasonic receiver. After receiving the optical pulse in another unit, the ultrasonic pulse is transmitted back to the receiver unit. The transmission time of the optical signal is negligible, so the microcontroller (on the receiving device) starts a timer when the optical signal is sent. Therefore, the timer value when the ultrasonic pulse is detected in the receiver is the transit time of the ultrasonic signal between the transducers. From this transmission time and speed of sound, the distance between the transducers can be calculated. This approach is limited to situations where transducers and associated electronics can be installed at both ends of the distance being measured [17–19].

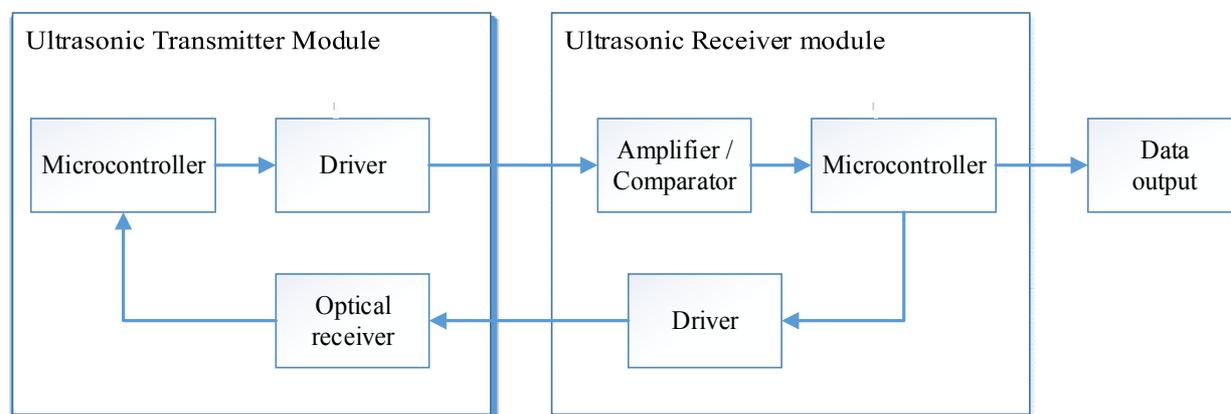


Fig. 4. Block diagram of the system

2.4. Optical description of the signal

An IR transmitter (infrared wavelength range of 870 nm) is an LED that is turned on (pulsed) by a transistor connected to a microcomputer [20, 21]. This pulse (0.5 ms) acts as a trigger signal. The lens built into the LED provides a 10 degree beam width.

The photodiode on the ultrasonic transmitter (IR receiver) is equipped with an IR cut filter to prevent accidental room illumination. Its current output is converted into a voltage pulse by an input amplifier. Subsequent amplifier stages increase the signal level and act as a high pass filter to further reduce low frequency noise. At the output of the comparator, the optical signal has the shape shown in Fig. 5 (the transmitted signal has a similar shape). The rising edge of the pulse is the synchronization signal.

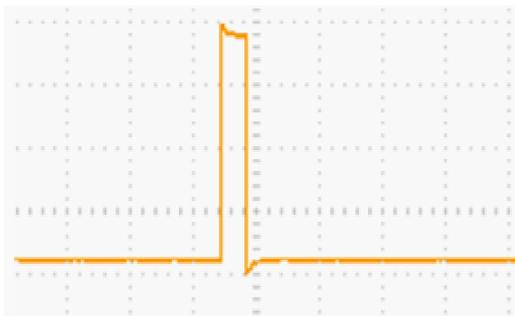


Fig. 5. Received optical pulse

2.5. Transmission of an ultrasonic signal

Conventional ceramic piezoelectric transducers are used for both the transmitter and receiver. The tuned transducer rings (40 kHz) when excited by a single square-wave pulse (pulse). Due to the low damping, the transmitted wave sequence has a long exponential decay due to a single pulse or pulse. While the signal transmission rise time is different, there is no received signal.

The voltage waveform of the transmitter transmitter is shown in Fig. 6.

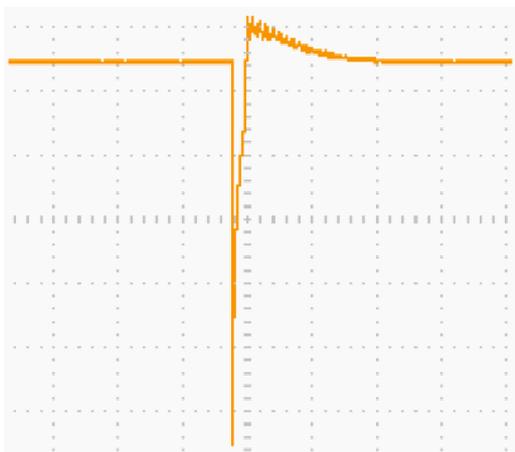


Fig. 6. Measuring form of the transmitter

2.6. Ultrasonic receiver (UR)

An UR with a high gain ($\times 100$) amplifies the signal from the receiving sensor, and the output is connected to a comparator, which, when the signal exceeds the threshold level, detects the received pulse (Fig. 7). The advantage is a faster rise time and a more accurate waveform, while the disadvantage is a much lower transmission amplitude than with conventional multi-cycle waveform excitation. This disadvantage is overcome here by using one-way transmission of the ultrasonic signal. If the transmitted waveform was not correctly formed by the second pulse, the transducer will ring excessively [14, 15].

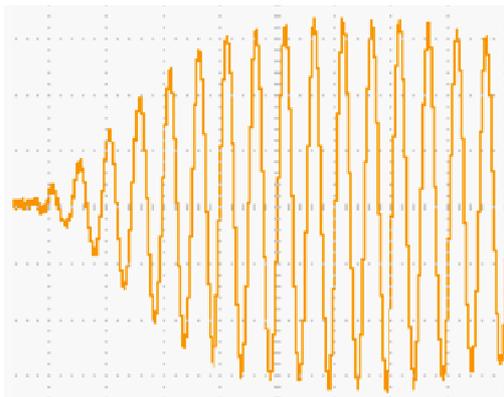


Fig. 7. Received ultrasonic signal

2.7. Microcomputer signal processing

The microcontroller (Fig. 8) detects the signal from the comparator and records the arrival time, which allows you to measure the time between the transmission of the optical pulse and the reception of the ultrasonic pulse. Knowing the speed of sound, the microcontroller converts this information into the distance between the ultrasonic transducers.

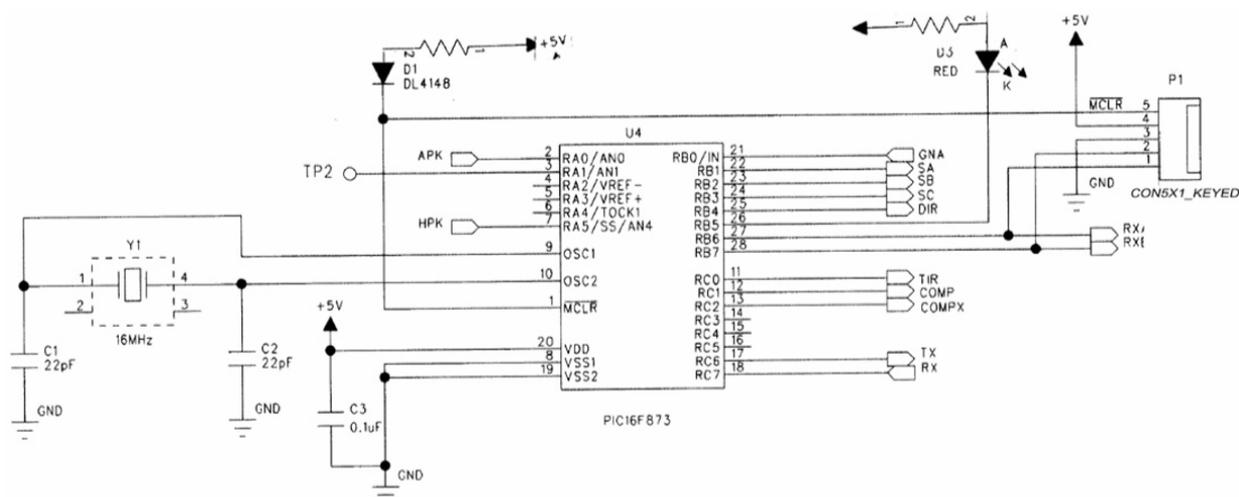


Fig. 8. Microcontroller circuit

Data is transferred to an external computer using the RS485 serial data bus.

Conclusion

In this work, optical ultrasonic transceivers have been investigated and developed, which can receive and generate ultrasonic pulses with a duration in the nanosecond range when using an ultrafast laser. As a result of the development of the opto-ultrasound technology, it can be noted that it is more efficient than the standard ultrasonic signal, providing with less signal loss and more accurate location of the reference points of the sensor, in particular, the transmitting and receiving transducers (sensors). In addition, by combining the principle of generating photo-acoustic ultrasound with optical fibers, compact ultrasonic transmitters can be obtained.

An optical pulse is used to synchronize the transmitter and receiver. In the block diagram shown in Fig. 4, an optical pulse is transmitted from the ultrasonic receiver unit, initiated by its microcontroller, to the ultrasonic transmitter unit. Thus, the proposed approach based on ultrasound signal transmission and reception using optics (fiber optics) allows obtaining the following advantages:

- the loss of an ultrasonic signal is much less than with traditional reception and transmission;
- the location of the transducers is clearly defined;
- the phase and shape of the pulses are controllable and reproducible.

References

1. Filonenko V., Cullen C., Carswell J. Investigating Ultrasonic Positioning on Mobile Phones. *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2010, pp. 15–17.
2. Marina M.D., Norziana J., Jacenhta M. Indoor positioning: technology comparison analysis. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, no. 7, pp. 133–137.
3. Rosenthal A., Razansky D., Ntziachristos V. High-Sensitivity Compact Ultrasonic Detector Based on a Pi-Phase-Shifted Fiber Bragg Grating. *Opt. Lett.*, 2011, no. 36, pp. 1833–1835.
4. Keda Y.K., Yoshihiro O., Hiroshi U. International standard of infrared data communication, IrDA. *Shapu Giho/Sharp Technical Journal*, 1997, no. 68, pp. 11–17.
5. Saidov B.B., Tambovtsev V.I., Prokopov I.I. Spectrum Transformation of an Amplitude-Modulated Signal on an Ohmic Nonlinear Element. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 71–78. DOI: 10.14529/ctcr200107
6. Brodie G., Qiu Y., Cochran S., Spalding G., MacDonald M. Optically Transparent Piezoelectric Transducer for Ultrasonic Particle Manipulation. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2014, no. 61, pp. 389–391.
7. Qiu Y. Piezoelectric Micromachined Ultrasound Transducer (PMUT) Arrays for Integrated Sensing, Actuation and Imaging. *Sensors*, 2015, no. 15, pp. 8020–8041.
8. Nakrop J., Sodsai W., Prasit N., Atipong S. Security System against Asset Theft by Using Radio Frequency Identification Technology. *5Th International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2008, pp. 761–764.
9. Elfes A. Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation. *IEEE J. Robot. Automat.*, 1987, vol. 3, pp. 249–265.
10. Jarvis R.A. A Perspective on Range finding Techniques for Computer Vision. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1983, vol. 2, pp. 122–139.
11. Saad M.M., Bleakley C.J., Dobson S. Robust High-Accuracy Ultrasonic Range Measurement System. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2011, vol. 60, pp. 3334–3341.
12. Zhou Q., Lau S., Wu D., Shung K.K. Piezoelectric Films for High Frequency Ultrasonic Transducers in Biomedical Applications. *Prog. Mater Sci.*, 2011, no. 56, pp. 139–174.
13. Biagi E., Margheri F., Menichelli D. Efficient Laser Ultrasound Generation by Using Heavily Absorbing Films as Targets. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2001, vol. 48, no. 6, pp. 1669–1680.
14. Wissmeyer G., Soliman D., Shnaiderman R., Rosenthal A., Ntziachristos V. All-Optical Optoacoustic Microscope Based on Wideband Pulse Interferometry. *Opt. Lett.*, 2016, no. 41, pp. 1953–1956.
15. Taruttis A., Ntziachristos V. Advances in Real-Time Multispectral Optoacoustic Imaging and Its Applications. *Nat. Phot.*, 2015, no. 9, pp. 219–227.
16. Ntziachristos V. Going Deeper than Microscopy: the Optical Imaging Frontier in Biology. *Nat. Methods*, 2010, no. 7, pp. 603–614.
17. Beard P. Biomedical Photo Acoustic Imaging. *Interface Focus*, 2011, no. 1, pp. 602–631.
18. Strohm E.M., Moore M.J., Kolios M.C. High Resolution Ultrasound and Photo Acoustic Imaging of Single Cells. *Photo Acoustics*, 2016, no. 4, pp. 36–42.
19. Darold W., Ming Z., Bhooma S. An Ultrasonic. *Optical Pulse Sensor for Precise Distance Measurements. Conference Paper*, 2005. pp. 1–5.
20. Hamilton J.D. High Frequency Optoacoustic Arrays Using Etalon Detection. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2000, no. 47, pp. 160–169.
21. Aggelis D., Barkoula N., Matikas M., Paipetis, T.A. Acoustic Structural Health Monitoring of Composite Materials: Damage Identification and Evaluation in Cross Ply Laminates Using Acoustic Emission and Ultrasonics. *Compos. Sci. Technol.*, 2012, no. 72, pp. 1127–1133.

Received 10 August 2020

ОПТОУЛЬТРАЗВУКОВЫЕ КАНАЛЫ СВЯЗИ

Б.Б. Саидов^{1,2}, В.Ф. Тележкин¹

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

² Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

Введение. Ультразвук широко используется в различных приложениях, таких как мониторинг состояния конструкций, биомедицинская ультразвуковая визуализация, приемопередача информации (данных). Ультразвуковые приемопередатчики являются одной из современных систем коммуникации как на ближнем, так и удаленном доступе. Действительно, технология процесса передачи информации с помощью каналов связи на основе ультразвуковых (УЗ) колебаний и физической реализации передачи с помощью оптоволоконна находят большое применение в условиях конфиденциальности обработки данных. При этом потребности беспроводной и проводной коммуникации потребовали разработки более совершенных приложений (программ, аппаратных решений). В частности, возникли новые проблемные вызовы, требующие, чтобы приемопередатчики имели высокую частоту, широкую полосу пропускания и компактные размеры. **Цель исследования.** Рассмотреть подход «технология – оптоультразвук», применяемый в каналах приемопередачи данных. Эта технология предполагает генерацию ультразвука импульсом с помощью оптико-акустического эффекта, с последующим приемом и обработкой УЗ-колебаний. Оптические ультразвуковые приемопередатчики, основанные на фотоакустическом (УЗ) принципе действия, имеют большой потенциал, в частности, для получения необходимой (супервысокой) частоты передаваемого сигнала; широкой полосы пропускания (быстродействие); простоты использования в качестве приемопередатчиков; не высокую стоимость изготовления. **Материалы и методы.** Были исследованы различные методы спектрального анализа (Фурье и Вейвлет), позволяющие обеспечить достижения поставленной выше цели. **Результаты.** По сравнению с традиционными технологиями приемопередачи информации оптические ультразвуковые приемопередатчики обеспечивают высокочастотную связь, широкую полосу пропускания и компактные размеры. **Заключение.** В работе исследованы методы спектрального анализа (Фурье и Вейвлет) и предложены на их основе возможные варианты реализации оптических ультразвуковых приемопередатчиков, которые могут генерировать ультразвуковые импульсы с длительностью в масштабе наносекунд с помощью сверхбыстрого лазера и принимать с высокой степенью защищенности конфиденциальные данные. При этом комбинируя принцип генерации фотоакустического ультразвука с применением оптоволоконна, можно получить компактные и недорогие ультразвуковые приемопередатчики.

Ключевые слова: ультразвук, приемники и передатчики (генерация) информации, данные, каналы связи, оптоволоконно, полоса пропускания, технология, лазерный ультразвук, датчики, оптико-акустический эффект.

Саидов Бехруз Бадридинович, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан; matem.1994@mail.ru, saidovb@susu.ru.

Тележкин Владимир Федорович, д-р техн. наук, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; telezhkinvf@susu.ru.

Поступила в редакцию 10 августа 2020 г.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Saidov, B.B. Opto-Ultrasonic Communication Channels / B.B. Saidov, V.F. Telezhkin // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 55–62. DOI: 10.14529/ctcr200406

FOR CITATION

Saidov B.B., Telezhkin V.F. Opto-Ultrasonic Communication Channels. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 55–62. DOI: 10.14529/ctcr200406

МЕТОД СИНТЕЗА СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ

В.Н. Бурков, И.В. Буркова, А.В. Щепкин

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук,
г. Москва, Россия*

Введение. Показано, что системы комплексного оценивания (КО) на основе дихотомического дерева критериев и совокупности матриц свертки критериев (обобщенных критериев) широко применяются при оценке самых различных объектов. **Цель исследования.** Для построения системы КО при заданной совокупности критериев необходимо решить две задачи.

1. Выбрать структуру дихотомического дерева критериев.
2. Определить матричные свертки пар критериев (обобщенных критериев) в каждой вершине дерева (за исключением висячих).

В статье рассматривается вторая задача, т. е. задача определения матриц свертки критериев. На практике эта задача часто решается на основе экспертных мнений. **Материалы и методы.** Пусть задано множество вариантов (под вариантом понимается совокупность оценок критериев) и эксперты определили комплексные оценки каждого варианта из этого множества. Задача заключается в определении матричных свертки в каждой вершине дерева таких, что КО каждого варианта в полученной системе КО равна экспертной оценке. В работе определен класс унифицированных механизмов КО, которые удовлетворяют следующим условиям.

1. Все матрицы унифицированного механизма комплексного оценивания имеют одинаковую размерность.
2. Для любой матрицы все строки различны и все столбцы различны.
3. Все матрицы монотонны по строкам и столбцам.

Если все оценки варианта равны некоторому баллу, то и комплексная оценка равна этому баллу. То есть если $j(S)$ – вариант из множества S , у которого оценки всех критериев равны j , то его комплексная оценка (КО) равна $K(j(S)) = j$. **Результаты.** Рассмотрены два случая.

В первом случае эксперты могут давать оценки вариантов с любым множеством оценок критериев. Во втором случае эксперты могут давать КО только полных вариантов, то есть вариантов, содержащих оценки всех критериев. Для первого случая предложен эффективный алгоритм с оценкой вычислительной сложности порядка lm^2 , где l – число критериев, а m – число градаций шкалы оценок. Алгоритм в существенной степени использует свойство 4 унифицированных механизмов. Для второго случая предложен метод решения задачи построения матриц «сверху-вниз», т. е. построения матрицы для корневой вершины, затем для смежных с ней и т. д. **Заключение.** Таким образом, в работе предложены алгоритмы синтеза унифицированных механизмов комплексного оценивания, при которых число требуемых экспертных вариантов минимально.

Ключевые слова: комплексное оценивание, унифицированный механизм, экспертный вариант, матричные свертки.

Введение

Задачи комплексного оценивания (КО) состояния или результатов деятельности сложного объекта широко распространены на практике [1–5]. Пусть сложный объект оценивается множеством l критериев. Предположим, что оценка по каждому критерию может принимать значения из множества $X = (0, 1, 2, \dots, m-1)$. Совокупность оценок всех критериев будем называть полным вариантом и обозначать $x \in X = \prod_i X_i$, а совокупность оценок подмножества критериев Q будем называть вариантом. Функция $K(x)$, определенная для всех вариантов, называется комплексной (интегральной) оценкой варианта. Существует много различных представлений этой функции (линейные, аддитивные, мультипликативные и др. [6, 7]).

Широкое распространение получили механизмы комплексного оценивания на основе дихотомических деревьев и совокупности матриц (матричных свертки), определенных в вершинах

дерева (за исключением висячих вершин) [8–15]. Пример механизма КО для случая трех критериев, каждый из которых принимает два значения – 0 или 1, приведен на рис. 1.

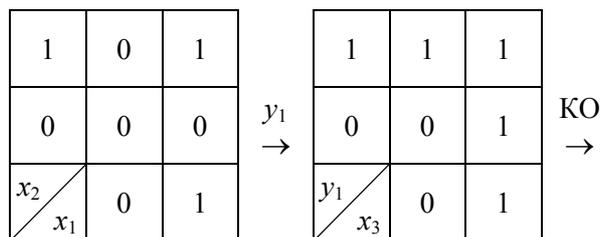


Рис. 1. Пример механизма КО
Fig. 1. An example of a KO mechanism

Определение 1. Структурой механизма КО называется дихотомическое дерево (прадерево) с l висячими вершинами, каждой из которых соответствует определенный критерий.

Определение 2. Механизм КО называется монотонным, если комплексная оценка является неубывающей функцией своих переменных (критериев).

Определение 3. Критерий называется значимым, если при его изменении от 0 до $(m-1)$, комплексная оценка хотя бы одного полного варианта изменится (повысится).

В дальнейшем будем рассматривать монотонные механизмы КО.

Заметим, что если критерий не является значимым, то его можно исключить из множества критериев, поскольку он никак не влияет на величину комплексной оценки.

Таким образом, для создания механизма КО необходимо решить две задачи.

1. Выбрать структуру механизма.
2. Предложить совокупность из $(l-1)$ матриц для каждой не висячей вершины дерева.

Сегодня эти задачи решаются на основе мнений экспертов.

В статье рассматривается подход к решению задачи 2, в основе которой лежит формирование матричных сверток при заданном множестве вариантов, для которых эксперты определили КО.

1. Постановка задачи

В статье рассматриваются унифицированные механизмы КО (УМКО), которые удовлетворяют следующим условиям.

1. Все матрицы УМКО имеют одинаковую размерность.
2. Для любой матрицы все строки различны и все столбцы различны.
3. Все матрицы монотонны по строкам и столбцам.
4. Если все оценки варианта равны некоторому баллу, то и комплексная оценка равна этому баллу. То есть если $j(S)$ – вариант из множества S , у которого оценки всех критериев равны j , то его комплексная оценка (КО) равна

$$K(j(S)) = j.$$

Примем, что задана структура механизма КО. Для каждого варианта $x \in X$ эксперты определили комплексную оценку $K(x)$.

Для формальной постановки задачи обозначим S_i – множество оценок критериев, комплексная оценка K_i которых определяется в вершине i . Если j, k – множество вершин дерева, непосредственно предшествующих вершине i , то

$$S_i = S_j \cup S_k,$$

а оценка K_i получается на основе матричной свертки обобщенных оценок K_j и K_k . В случае, если критерии оцениваются по m -балльной шкале, матричная свертка A_i двух комплексных оценок – это матрица $m \times m$, столбцы которой соответствуют возможным оценкам вариантов множества критериев S_j , строки – возможным оценкам вариантов множества критериев S_k , а a_{jk} определяют комплексную оценку вариантов множества критериев S_i .

Задача. Определить $(l-1)$ матрицы A_i такие, что для любого экспертного варианта x комплексная оценка равна $K(x)$.

Учитывая, что экспертиза вариантов требует времени, желательно, чтобы число экспертных вариантов было минимальным.

2. Двухбалльные шкалы

Рассмотрим случай двухбалльных шкал (каждый критерий принимает одно из двух значений – 0 или 1).

Заметим, что существуют четыре возможные матрицы свертки 2×2 для каждой вершины дерева, за исключением висячих (рис. 2).

<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 40px; height: 40px;"> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">1</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">0</td></tr> </table>	0	1	0	0	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 40px; height: 40px;"> <tr><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">1</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">1</td></tr> </table>	1	1	0	1	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 40px; height: 40px;"> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">1</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">1</td></tr> </table>	0	1	0	1	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 40px; height: 40px;"> <tr><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">1</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">0</td></tr> </table>	1	1	0	0
0	1																		
0	0																		
1	1																		
0	1																		
0	1																		
0	1																		
1	1																		
0	0																		
а)	б)	в)	г)																

Рис. 2. Возможные матрицы свертки для $m = 2$
Fig. 2. Possible convolution matrices for $m = 2$

Матрицы в) и г) соответствуют случаям, когда один из критериев или обобщенных критериев не является значимым. Матрица а) соответствует случаю взятия минимальной из двух оценок, а матрица б) – взятию максимальной из двух оценок.

Заметим, что для монотонных комплексных оценок имеют место следующие утверждения.

1. При нулевых значениях критериев любого варианта соответствующая комплексная оценка равна 0. Действительно, если комплексная оценка равна 1, то в силу монотонности комплексные оценки всех других вариантов должны быть равны 1. В этом случае задача КО теряет смысл (КО любого варианта равна 1).

2. При единичных значениях всех критериев любого варианта соответствующая комплексная оценка равна 1. Действительно, если она равна 0, то в силу монотонности комплексные оценки всех других вариантов должны быть равны 0 и задача КО теряет смысл (оценки всех вариантов равны 0).

Рассмотрим вершину i дерева, в которой происходит свертка множеств критериев S_j и S_k , $S_i = S_j \cup S_k$. Необходимо определить 2×2 матрицу (рис. 3).

1	a_{10}	1
0	0	a_{01}
S_j / S_k	0	1

Рис. 3. Матрица 2×2
Fig. 3. Matrix 2×2

Рассмотрим три возможных случая.

1. Эксперты могут оценить (определить) КО любого варианта.
2. Эксперты могут оценить только полные варианты.
3. Эксперты могут оценить только варианты с числом критериев не более $m_1 < m$.

Рассмотрим первый случай.

Обозначим M_i – матрицу в вершине i ; S_i – множество вариантов, оцениваемых в вершине i ; n, m – вершины, непосредственно предшествующие вершине i ; S_n, S_m – соответствующие множества вариантов. Очевидно, что

$$S_i = S_n \cup S_m.$$

Обозначим далее $0(S)$ – вариант $x \in S$, все оценки которого равны 0; $1(S)$ – вариант $x \in S$, все оценки которого равны 1; $(0(S_n), 1(S_m))$ – вариант $x \in S_i$, у которого оценки $x \in S_n$ равны 0, а оценки $x \in S_m$ равны 1. Соответственно $(1(S_n), 0(S_m))$ – вариант $x \in S_i$, у которого все оценки

$x \in S_n$ равны 1, а все оценки $x \in S_m$ равны 0. Заметим, что $K(0(S)) = 0$, $K(1(S)) = 1$ для любого S . Обозначим a_{01} – экспертную оценку варианта $(0(S_n), 1(S_m))$; a_{10} – экспертную оценку варианта $(1(S_n), 0(S_m))$.

Заметим, что a_{01} и a_{10} полностью определяют матрицу M_i , а именно, если $a_{01} = a_{10} = 0$, то это min-матрица, если $a_{01} = a_{10} = 1$, то это max-матрица, если $a_{01} = 0, a_{10} = 1$, то множество критериев, оцениваемых в вершине n , не является значимым, и их можно исключить, если $a_{01} = 1, a_{10} = 0$, то множество критериев, оцениваемых в вершине m , не является значимым, и эти критерии можно исключить из рассмотрения.

Таким образом, для получения матрицы M_i достаточно получить экспертные оценки всего двух вариантов. Для получения всех матриц достаточно получить экспертные оценки $2(l-1)$ вариантов.

Рассмотрим второй случай.

Алгоритм существенно усложняется, поскольку эксперты дают оценки только полных вариантов. Поэтому оценки остальных вариантов приходится получать на основе оценок полных вариантов. Алгоритм рассмотрим сначала на примере.

Пример 1. Рассмотрим задачу с 5 критериями. Структура механизма приведена на рис. 4.

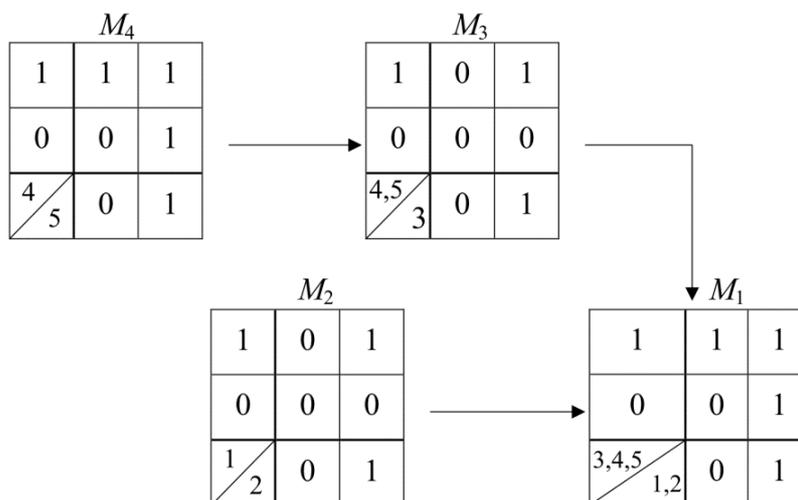


Рис. 4. Механизм КО примера 1
Fig. 4. KO mechanism of example 1

Шаг 1. Получаем матрицу M_1 . Для этого берем два полных варианта

$$(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (00111) \text{ и } (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (11000)$$

с экспертными оценками

$$K(00111) = 1 \text{ и } K(11000) = 1.$$

Матрица M_1 является max-матрицей.

Шаг 2. Получаем матрицу M_2 . Для этого рассматриваем два варианта – $(x_1, x_2) = (01)$ и $(x_1, x_2) = (10)$. Но у нас нет экспертных оценок этих вариантов. Поэтому рассматриваем полные варианты

$$(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (01000) \text{ и } (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (01111)$$

для варианта $(x_1, x_2) = (01)$ и полные варианты

$$(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (10000) \text{ и } (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (10111)$$

для варианта $(x_1, x_2) = (10)$.

Пусть экспертные оценки вариантов

$$K(01000) = 0 \text{ и } K(01111) = 1.$$

В этом случае комплексная оценка варианта $(0, 1)$ равна 0.

Пусть экспертные оценки вариантов

$$K(10000) = 0 \text{ и } K(10111) = 1.$$

Следовательно, матрица M_2 является min-матрицей.

Заметим, что потребовалось рассмотреть 4 полных варианта.

Шаг 3. Получаем матрицу M_3 . По аналогии с шагом 2 рассматриваем 4 полных варианта – (00100), (11100), (00011), (11011). Пусть их экспертные оценки

$$K(00100) = 0, K(11100) = 1, K(00011) = 0, K(11011) = 1.$$

Следовательно, комплексные оценки вариантов $K(100)$ и $K(011)$ равны 0 и матрица M_3 является min-матрицей.

Шаг 4. Получаем матрицу M_4 . Рассматриваем два варианта – $(x_4, x_5) = (01)$ и $(x_4, x_5) = (10)$.

Но их оценок мы также не имеем. Для получения оценок рассматриваем 4 варианта – $(x_3, x_4, x_5) = (001)$, (101), (010) и (110). Но их оценок мы также не имеем. Поэтому рассматриваем 8 полных вариантов:

$$(00001), (11001), (00101), (11101), (00010), (11010), (00110), (11110).$$

Пусть их экспертные оценки равны

$$K(00001) = 0, K(11001) = 1, K(00101) = 1, K(11101) = 1, \\ K(00010) = 0, K(11010) = 1, K(00110) = 1, K(11110) = 1.$$

Поскольку $K(00001) = 0$, $K(11001) = 1$, то $K(001) = 0$. Далее, так как $K(00101) = 1$ и $K(11101) = 1$, то $K(101) = 1$. Аналогично $K(010) = 0$, $K(110) = 1$. Наконец, поскольку $K(001) = 0$, $K(101) = 1$, то $K(01) = 1$, а поскольку $K(110) = 1$, а $K(010) = 0$, то $K_{10} = 1$. Следовательно, M_4 является тах-матрицей.

Определение 4. Уровнем матрицы M_j называется число следующих за вершиной j вершин, включая вершину j .

Корневая вершина имеет уровень 1, непосредственно следующая за ней – уровень 2 и т. д.

Дадим описание алгоритма.

Пусть матрица M_j имеет уровень q и является сверткой подмножеств критериев S_t и S_q . Требуется получить оценки $K(K-1)$ вариантов. Примем, что уже получено $(q-1)$ матриц, следующих за M_j . Пусть M_{j1} – матрица, непосредственно следующая за M_j . Рассмотрим процедуру получения элемента a_{ip} матрицы M_j . Для этого нужно получить оценку $K(i(S_q); p(S_t))$. Но эксперты не могут дать такую оценку, если вариант $(i(S_q); p(S_t))$ не является полным. Поэтому рассматриваем матрицу M_{j1} . Пусть эта матрица является сверткой подмножеств (S_q, S_t) и S_r . Получим оценки следующих двух вариантов:

$$(i(S_q), p(S_t), 0(S_r)), (i(S_q), p(S_t), 1(S_r)).$$

Возможны два случая.

1. $S_q \cup S_t \cup S_r$ – множество оценок полных вариантов. В этом случае мы имеем экспертные оценки рассматриваемых 2 вариантов. Сравниваем полученную последовательность оценок со строками матрицы M_{j1} . Если найдется строка матрицы M_{j1} , элементы которой совпадают с полученной последовательностью оценок, то оценка, соответствующая этой строке, определяет комплексную оценку

$$K(i(S_q); p(S_p)) = a_{ip}. \quad (1)$$

2. $S_q \cup S_t \cup S_r$ не является множеством оценок полных вариантов. В этом случае переходим к матрице M_{j2} , непосредственно следующей за матрицей M_{j1} , и повторяем предыдущую процедуру для каждого из двух вариантов и т. д. Если матрица M_j имеет уровень q , то описанную процедуру применяем $(q-1)$ раз. В результате получаем 2^{q-1} полных вариантов. Получив их экспертные оценки, методом обратного хода определяем оценки (1).

Как следует из примера, для получения матрицы, имеющей уровень q , необходимо иметь

экспертные оценки 2^q полных вариантов. Если обозначить q_j уровень матрицы M_j , то число полных вариантов, необходимое и достаточное для получения матрицы M_j , равно

$$N = \sum_{j=1}^{l-1} 2^{q_j}.$$

Теорема 1. Минимальное число вариантов N имеет максимально симметричную структуру.

Рассмотрим третий случай.

Эксперты могут давать оценки вариантов с числом критериев не более $p < l$. В этом случае требуется декомпозиция дерева на поддеревья с числом висячих вершин не более p . Далее для каждого поддерева применяется алгоритм, описанный в первом случае.

Приведем простую, но важную теорему.

Теорема 2. Пусть комплексная оценка варианта равна 0. Тогда существует хотя бы один путь из висячих вершин в корневую, длина которого равна 0 (длины дуг пути равны КО в соответствующей вершине).

Доказательство. Очевидно, что найдется хотя бы одна висячая вершина с КО, равной 0. Пометим все такие висячие вершины знаком (+). Далее помечаем знаком (+) все вершины, в которые входят дуги из помеченных вершин длины 0. Пусть в результате корневая вершина не помечена. Тогда все дуги, исходящие из помеченных вершин в непомеченные, имеют длины, равные 1. Но в этом случае КО не может быть равной 0.

Определение 5. Пути из висячих вершин в корневую нулевой длины называются критическими (соответствующие вершины также называются критическими).

Важность критических путей заключается в том, что при разработке мер по повышению КО в первую очередь следует обращать внимание на критерии, соответствующие критическим вершинам.

3. Произвольные шкалы

Рассмотрим общий случай шкал с m градациями. Обозначим $j(S)$ вариант из множества S , у которого оценки всех критериев равны j . Основное предположение состоит в том, что $K(j(S)) = j$, то есть если вариант состоит из одинаковых оценок j , то и его комплексная оценка равна j . Как и с двухбалльной шкалой, рассмотрим три варианта.

1. Эксперты могут давать оценки любых вариантов.

Рассмотрим матрицу M_j . Обозначим ее элементы a_{ip} , $i, p = \overline{0, m-1}$. В силу сделанных предположений $a_{ii} = i$, $i = \overline{0, m-1}$. Осталось определить $m(m-1)$ элементов a_{ip} , $i \neq j$. Пусть матрице M_j соответствуют подмножества оценок S_i и S_p , $S_j = S_i \cup S_p$, $S_i \cap S_p = \emptyset$. Для определения элемента a_{ip} рассмотрим вариант $(i(S_q); p(S_t))$ с экспертной оценкой $K(i(S_q); p(S_t))$.

Утверждение. $a_{ip} = K(i(S_q); p(S_t))$.

Доказательство. Оценка варианта $(i(S_q)) = i$. Оценка варианта $(p(S_t)) = t$. Вариант $(i(S_q); p(S_t)) \in S_j$ является сверткой этих двух вариантов, которая по определению равна a_{ip} .

Таким образом, для получения матрицы M_j достаточно рассмотреть $m(m-1)$ вариантов из множества S_j с их экспертными оценками. Для построения механизма КО с l критериями достаточно рассмотреть $m(m-1)(l-1)$ вариантов.

Пример 2. Имеется последовательная структура с тремя критериями, причем сначала происходит свертка оценок критериев 1 и 2, а затем свертка оценок этих критериев с оценками критерия 3 (см. рис. 1). Примем $m = 3$.

Шаг 1. Рассмотрим матрицу M_1 . Необходимо получить шесть значений a_{ij} . Имеем 6 полных вариантов:

1. (001), $K(001) = 0 = a_{01}$.
2. (002), $K(002) = 1 = a_{02}$.
3. (110), $K(110) = 1 = a_{10}$.
4. (112), $K(112) = 2 = a_{12}$.
5. (220), $K(220) = 2 = a_{20}$.
6. (221), $K(221) = 2 = a_{21}$.

Матрица M_1 приведена на рис. 5.

Шаг 2. Рассмотрим матрицу M_1 . Имеем:

1. (01), $K(01) = 1 = a_{01}$.
2. (02), $K(02) = 1 = a_{02}$.
3. (10), $K(10) = 0 = a_{10}$.
4. (12), $K(12) = 2 = a_{12}$.
5. (20), $K(20) = 1 = a_{20}$.
6. (21), $K(21) = 1 = a_{21}$.

Соответствующая матрица M_2 приведена на рис. 6.

Всего потребовалось

$$m(m-1)(l-1) = 12$$

экспертных вариантов.

2	2	2	2
1	1	1	2
0	0	0	1
x_1, x_2 x_3	0	1	2

Рис. 5. Матрица M_1
Fig. 5. Matrix M_1

2	1	1	2
1	0	1	2
0	0	1	1
x_1 x_2	0	1	2

Рис. 6. Матрица M_2
Fig. 6. Matrix M_2

2. Эксперты могут давать оценки только полных вариантов.

Пусть матрица M_j имеет уровень q и является сверткой подмножеств критериев S_i и S_p . Требуется получить оценки $m(m-1)$ вариантов. Примем, что уже получено $(q-1)$ матриц, следующих за M_j . Пусть M_{j1} – матрица, непосредственно следующая за M_j . Рассмотрим процедуру получения элемента a_{ip} матрицы M_j . Для этого нужно получить оценку $K(i(S_q); p(S_t))$. Но эксперты не могут дать такую оценку, если вариант $(i(S_q); p(S_t))$ не является полным. Поэтому рассматриваем матрицу M_{j1} . Пусть эта матрица является сверткой подмножеств (S_q, S_t) и S_r . Получим оценки следующих m вариантов:

$$(i(S_q), p(S_t), 0(S_r)), \dots, (i(S_q), p(S_t), (K-1)(S_r)).$$

Возможны два случая.

1. $S_q \cup S_t \cup S_r$ – множество оценок полных вариантов. В этом случае мы имеем экспертные оценки рассматриваемых m вариантов. Сравниваем полученную последовательность оценок со строками матрицы M_{j1} . Если найдется строка матрицы M_{j1} , элементы которой совпадают с полученной последовательностью оценок, то оценка, соответствующая этой строке, определяет комплексную оценку

$$K(i(S_q); p(S_t)) = a_{ip}. \quad (2)$$

2. $S_q \cup S_t \cup S_r$ не является множеством оценок полных вариантов. В этом случае переходим к матрице M_{j2} , непосредственно следующей за матрицей M_{j1} , и повторяем предыдущую процедуру для каждого из m вариантов и т. д. Если матрица M_j имеет уровень q , то описанную процедуру применяем $(q-1)$ раз. В результате получаем m^{q-1} полных вариантов. Получив их экспертные оценки, методом обратного хода определяем оценки (2).

Пример 2. Возьмем данные предыдущего примера.

Шаг 1. Матрица M_1 является матрицей свертки полных вариантов. Поэтому она была получена в предыдущем примере.

Шаг 2. Матрица M_2 имеет уровень $q = 2$. Ограничимся получением элемента a_{12} . Необходимо получить $m = 3$ оценок вариантов

$$(1, 2, 0), (1, 2, 1) \text{ и } (1, 2, 2).$$

Это полные варианты. Пусть их экспертные оценки

$$K(1, 2, 0) = K(1, 2, 1) = K(1, 2, 2) = 2.$$

Строка этих оценок совпадает со строкой матрицы M_1 , соответствующей оценке 2. Поэтому $a_{12} = 2$. Повторяем эту процедуру для остальных пяти элементов матрицы M_2 .

Замечание 1. Если не найдется ни одной строки матрицы, оценки которой совпадают с последовательностью из m полученных оценок, то механизма КО не существует.

Замечание 2. Предполагается, что все строки матриц, следующих за M_j , различаются. В противном случае размер шкалы оценок можно уменьшить.

Таким образом, для построения механизма КО достаточно получить экспертные оценки

$$\sum_{j=1}^{l-1} m^{q_j} (m-1)$$

полных вариантов, где q_j – уровень матрицы M_j .

Остается справедливой теорема об оптимальности максимально симметричной структуры. Дадим обобщение теоремы 2.

Теорема 3. Пусть комплексная оценка варианта равна j . Тогда существует путь из всяких вершин в конечную, все длины дуг которого не превышают j .

Доказательство аналогично доказательству теоремы 2.

3. *Эксперты могут давать оценки вариантов с числом критериев не более $m_1 < m$.*

Как и в случае двухбалльных шкал, в этом случае разбиваем дерево на поддеревья с числом всяких вершин не более m_1 и применяем процедуру двух предыдущих случаев для каждого поддерева.

Заключение

В статье рассмотрена задача построения унифицированных механизмов комплексного оценивания состояния или результатов деятельности сложных систем на основе экспертных вариантов. Заметим, что механизмы комплексного оценивания, описанные в [1–5], являются унифицированными.

Поскольку экспертам предлагается оценить только часть возможных вариантов, нельзя утверждать, что полученный механизм КО будет удовлетворять предпочтениям экспертов на других вариантах. Мы можем лишь утверждать, что если существует механизм КО, удовлетворяющий всем предпочтениям экспертов, то это механизм, полученный на основе описанных выше алгоритмов.

Полученные оценки числа экспертных вариантов естественно достаточны для синтеза механизма КО. Для двухбалльных шкал они являются и необходимыми, т. е. определяют минимальное число экспертных вариантов, требуемое для синтеза механизма. Для произвольных шкал оценка минимального числа экспертных вариантов требует дальнейших исследований.

В рассмотренной постановке экспертам предлагается оценить предъявляемое им множество вариантов. Представляет интерес другая задача, когда эксперты предлагают множество вариантов с их оценками и требуется построить механизм КО, удовлетворяющий предпочтениям экспертов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-07-01258.

Литература

1. *Модели, методы и механизмы управления научно-техническими программами* / В.Н. Бурков, Б.Н. Коробец, В.А. Минаев, А.В. Щепкин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 202 с.
2. *Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: моногр.* / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др.; под ред. О.В. Логиновского, А.А. Максимова. – М.: Инфра-М, 2018. – 410 с. – (Научная мысль).
3. *Кондратьев, В.Д. Проектное управление при реализации стратегии безопасности дорожного движения* / В.Д. Кондратьев, А.В. Щепкин // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. – 2019. – Вып. 4 (59). – С. 112–119.

4. Бурков, В.Н. Информационные технологии разработки систем управления глобальной безопасностью / В.Н. Бурков, И.В. Буркова, А.В. Щепкин // *Стратегические приоритеты*. – 2018. – № 1 (17). – С. 25–37.
5. Бурков, В.Н. Механизмы повышения безопасности дорожного движения // В.Н. Бурков, В.Д. Кондратьев, А.В. Щепкин. – М.: УРСС, 2011. – 208 с.
6. Методы определения коэффициентов важности критериев / А.М. Анохин, В.А. Глотов, В.В. Павельев, А.М. Черкашин // *Автоматика и телемеханика* – 1997. – № 8. – С. 3–35.
7. Айзерман, М.А. Выбор вариантов: основы теории / М.А. Айзерман, Ф.Т. Алескеров. – М.: Наука, 1990. – 206 с.
8. Механизмы управления: учеб. пособие / под ред. Д.А. Новикова. – М.: Ленанд, 2011. – 192 с. – (Умное управление).
9. Бурков, В.Н. Проблемы синтеза механизма комплексного оценивания на основе обучающего набора данных / В.Н. Бурков, Н.А. Коргин, О.Л. Марин // *Труды 13-го Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ XIII, Москва, 2019)*. – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 2280–2284.
10. Глотов В.А. Векторная стратификация / В.А. Глотов, В.В. Павельев. – М.: Наука, 1984. – 132 с.
11. Глотов, В.А. Дихотомическая декомпозиция многомерной функции / В.А. Глотов // *Механизмы функционирования организационных систем. Теория и приложения*. – М.: ИПУ РАН, 1982. – Вып. 29. – С. 104–110.
12. Умрихина, Е.В. Задача представления метрических сверток обобщенными аддитивными свертками при формировании комплексных оценок / Е.В. Умрихина // *АиТ*. – 1987. – № 11. – С. 161–171.
13. Комплексное оценивание: принцип бинарности и его приложения / А.М. Анохин, В.А. Глотов, В.В. Павельев, А.М. Черкашин. – М.: ИПУ. – 1994. – 38 с.
14. Алексеев, А.О. Комплексное оценивание сложных объектов в условиях неопределенности / А.О. Алексеев // *Прикладная математика и вопросы управления*. – 2019. – № 1. – С. 103–131.
15. Алексеев, А.О. Управление сложными объектами, состояния которых описываются с помощью матричных механизмов комплексного оценивания / А.О. Алексеев // *Прикладная математика и вопросы управления*. – 2020. – № 1. – С. 114–139.

Бурков Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва; vlab17@bk.ru.

Буркова Ирина Владимировна, д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва; irbur27@mail.ru.

Щепкин Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва; sch@ipu.ru.

Поступила в редакцию 10 сентября 2020 г.

**METHOD OF SYNTHESIS
OF THE INTEGRATED ASSESSMENT SYSTEM**

V.N. Burkov, *vlab17@bk.ru*,

I.V. Burkova, *irbur27@gmail.com*,

A.V. Shchepkin, *sch@ipu.ru*

*V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

Introduction. Systems of complex estimation (CO) based on a dichotomous tree of criteria and a set of criteria convolution matrices (generalized criteria) are widely used in the evaluation of a wide variety of objects. **Purpose of the study.** To build a CO system for a given set of criteria, you need to solve two problems:

1. To choose the structure of the dichotomous tree of criteria.

2. To define matrix convolutions of pairs of criteria (generalized criteria) at each vertex of the tree (except for hanging ones).

The article deals with the second problem, i.e. the problem of determining matrices the criteria convolution. In practice, this task is often solved based on expert opinions. **Materials and methods.** Let us assume that there are a set of options (a variant is a set of criteria estimates) and experts have defined complex estimates for each option from this set. The task is to define matrix convolutions at each vertex of the tree such that the CO of each variant in the resulting system CO is equal to the EXPERT estimate.

The paper defines a class of unified CO mechanisms that meet the following conditions:

1. All matrices of the unified complex estimation mechanism have the same dimension.

2. For any matrix all rows are different and all columns are different.

3. All matrices are monotonous in rows and columns;

4. If all the variant scores are equal to a certain score, then the complex score is equal to this score.

Results. Two cases are considered. In the first case, experts can give estimates of options with any set of criteria estimates. In the second case, experts can give a CO of only complete options, that is, options that contain estimates of all criteria. For the first case, an efficient algorithm with an estimate of computational complexity of the order of lm^2 is proposed, where l is the number of criteria, and m is the number of gradations of the rating scale. The algorithm makes significant use of the 4 property of unified mechanisms.

For the second case, we propose a method for solving the problem by constructing “top-down” matrices, i.e. constructing a matrix for the root vertex, then for adjacent ones, and so on. **Conclusion.** Thus, the paper proposes algorithms for the synthesis of unified mechanisms for complex evaluation, in which the number of required expert options is minimal.

Keywords: complex assessment, unified mechanism, expert version, matrix convolution.

The work was partially supported by RFBR grant No. 18-07-01258.

References

1. Burkov V.N., Korobets B.N., Minayev V.A., Shchepkin A.V. *Modeli, metody i mekhanizmy upravleniya nauchno-tekhnicheskimi programmami* [Models, Methods and Mechanisms for Managing Scientific and Technical Programs]. Moscow, MGTU Publ., 2017. 202 p.

2. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N. et al. *Upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy: monogr.* [Management of industrial enterprises: strategies, mechanisms, systems: monograph]. Moscow, Infra-M Publ., 2018. 410 p.

3. Kondrat'yev V.D., Shchepkin A.V. [Project management in the implementation of the road safety strategy]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'nodorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*, 2019, vol. 4 (59), pp. 112–119. (in Russ.)

4. Burkov V.N., Burkova I.V., Shchepkin A.V. [Information Technologies for the Development of Global Security Management Systems]. *Strategicheskiye prioriteti*, 2018, no. 1 (17), pp. 25–37. (in Russ.)
5. Burkov V.N., Kondrat'yev V.D., Shchepkin A.V. *Mekhanizmy povysheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya* [Mechanisms for Increasing Road Safety]. Moscow, URSS, 2011. 208 p.
6. Anokhin A.M., Glotov V.A., Pavel'yev V.V., Cherkashin A.M. [Methods for Determining the Coefficients of the Importance of Criteria]. *Avtomatika i telemekhanika*, 1997, no. 8, pp. 3–35. (in Russ.)
7. Ayzerman M.A., Aleskerov F.T. *Vybor variantov: osnovy teorii* [Choice of Options: Fundamentals of Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 206 p.
8. Novikov D.A. (Ed.). *Mekhanizmy upravleniya: ucheb. posobiye* [Control mechanisms]. Moscow, Lenand Publ., 2011. 192 p.
9. Burkov V.N., Korgin N.A., Marin O.L. [Problems of the Synthesis of a Complex Assessment Mechanism Based on a Training Data Set]. *Proceedings of the 13th All-Russian Meeting on Management Problems (VSPU XIII, Moscow, 2019)*. IPU RAN, 2019, pp. 2280–2284. (in Russ.)
10. Glotov V.A., Pavel'yev V.V. *Vektornaya stratifikatsiya* [Vector stratification]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 132 p.
11. Glotov V.A. [Dichotomous Decomposition of a Multidimensional Function]. *Mechanisms of the functioning of organizational systems. Theory and applications*. IPU RAN, 1982, vol. 29, pp. 104–110. (in Russ.)
12. Umrikhina E.V. [The Problem of Representing Metric Convolutions with Generalized Additive Convolutions in the Formation of Complex Estimates]. *AiT*, 1987, no. 11, pp. 161–171. (in Russ.)
13. Anokhin A.M., Glotov V.A., Pavel'yev V.V., Cherkashin A.M. *Kompleksnoye otsenivaniye: printsip binarnosti i ego prilozheniya* [Complex Assessment: the Principle of Binarity and Its Applications]. Moscow, IPU, 1994. 38 p.
14. Alekseyev A.O. [Complex Estimation of Complex Objects in Conditions of Uncertainty]. *Applied Mathematics and Control Issues*, 2019, no. 1, pp. 103–131. (in Russ.)
15. Alekseyev A.O. [Management of Complex Objects, the States of Which are Described Using Matrix Mechanisms of Complex Assessment]. *Applied Mathematics and Control Issues*, 2020, no. 1, pp. 114–139. (in Russ.)

Received 10 September 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Бурков, В.Н. Метод синтеза системы комплексного оценивания / В.Н. Бурков, И.В. Буркова, А.В. Щепкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 63–73. DOI: 10.14529/ctcr200407

FOR CITATION

Burkov V.N., Burkova I.V., Shchepkin A.V. Method of Synthesis of the Integrated Assessment System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 63–73. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200407

Управление в социально-экономических системах

УДК 004.942

DOI: 10.14529/ctcr200408

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ ФИНАНСИРОВАНИЯ КОНВЕРСИИ ПРЕДПРИЯТИЙ

О.И. Дранко

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук,
г. Москва, Россия*

Цель исследования. Поставленная Президентом России задача увеличения выпуска гражданской продукции на предприятиях оборонного комплекса до 50 % в 2030 г. требует исследования различных необходимых ресурсов, а также моделей и методов управления ними. В условиях экономического кризиса, вызванного коронавирусом в 2020 г., возрастает актуальность исследования возможностей достижения этой значимой задачи. В данной работе ставится цель – разработка математической модели, проведение моделирования и оценка потребности в финансировании роста выпуска гражданской продукции на предприятиях отрасли научных исследований и разработок. **Методы.** Разрабатывается имитационная модель многопериодного прогнозирования финансового состояния предприятия. Для получения исходной информации используются методы обработки больших массивов данных. Для определения зависимостей статей финансовой отчетности применяются средства регрессионного анализа. Методы сценарного анализа позволяют рассмотреть и выделить существенные факторы влияния на цель исследования. **Результаты.** Разработана многопериодная модель прогнозирования финансово-экономического состояния предприятия для оценки последствий увеличения гражданской продукции на предприятиях научных исследований и разработок. Проведено агрегирование показателей финансовой отчетности, полученной из открытых данных Росстата. Выполнены имитационные расчеты в сценариях инерционного роста, роста с повышением эффективности, замещающего роста. Задача увеличения доли гражданской продукции до 50 % к 2030 г. на научно-технических предприятиях России потребует значительного дополнительного финансирования, оценка – около 1300 млрд руб. в инерционном сценарии. Разработка и реализация программы повышения эффективности предприятий значительно сокращает потребность в дополнительном финансировании, оценка – около 1100 млрд руб. при незначительном улучшении параметров эффективности. **Заключение.** Результаты данного исследования могут быть использованы для разработки программ развития промышленности как на уровне отрасли, так и на уровне отдельных предприятий. Увеличение выпуска гражданской продукции потребует значительного финансирования. Разработка и реализация программ повышения операционной эффективности предприятий может в разы сократить потребность в дополнительном финансировании.

Ключевые слова: имитационное моделирование, прогнозирование, стратегия, конверсия, развитие предприятий, большие массивы данных.

Введение

Президент Российской Федерации в Послании Федеральному собранию 01.12.2016 поставил задачу – довести долю гражданской продукции на предприятиях оборонно-промышленного комплекса в 2025 г. – до 30 %, к 2030 г. – не менее 50 % [1]. Оценка доли гражданской продукции в 2020 г. – 20 %.

Коронакризис притормозил, но не отменил задачу конверсии научно-технических предприятий.

В рамках проблематики развития промышленных организаций разработан широкий спектр методов имитационного и оптимизационного управления [2, 3].

Данная работа посвящена моделированию финансового состояния предприятий промышленности и научных разработок при увеличении объема гражданской продукции.

Имитационная модель рассматривается в рамках двухуровневой модели «отрасль (совокупность предприятий) – предприятие» как части более широкого подхода к моделированию социально-экономических систем «страна – регион / отрасль – предприятие – проект».

1. Модель прогнозирования

Используется имитационная модель прогнозирования финансовой отчетности последовательно по нескольким годам [4–6].

Финансовое состояние предприятия отражается в 2 основных документах – балансе и плане прибылей/убытков. В общем виде прогноз финансового состояния как системы из баланса B и плана о доходах/расходах (прибылям/убыткам) P запишем с помощью модели прогнозирования:

$$(B, P)^F = M(B_i, P_j, U, C_U), \quad (1)$$

где B – баланс; P – план прибылей/убытков; M – модель прогнозирования; U – управление показателями; C_U – затраты на управление показателями; F – индекс прогноза; i, j – индексы показателей.

Подмодели прогнозирования отдельных статей могут быть различными и существенно опираться на специфику отрасли и предприятия. В данной работе используется подход сохранения параметров бизнес-процессов (сроки оборачиваемости, удельные затраты, удельные инвестиции) и реинвестирования нераспределенной прибыли.

Изменение выручки S является внешним параметром для данной модели.

Модель прогнозирования большинства отдельных показателей G из множества $\{B_i, P_j\}$ выглядит следующим образом:

$$G_m^F = G_m^0 + k_G \Delta S + \varepsilon_m, \quad (2)$$

где S – выручка; G – статья баланса/прибылей и убытков; k – коэффициент переменности; ε – погрешность; Δ – символ прироста; m – индекс показателей; 0 – индекс начального периода.

Перечень показателей G включает от 20 до 50 показателей основных финансовых документов в зависимости от доступности информации и степени агрегирования документов.

Связь, увязывающая два основных финансовых документа, состоит в увеличении собственного капитала на величину нераспределенной прибыли NI .

$$\Delta Eq = S - \Sigma C_j, \quad (3)$$

где ΣC_j – перечень всех расходов, включая дивиденды.

При прогнозировании различных статей отдельно друг от друга возникает «потребность в финансировании» при отрицательном денежном потоке:

$$CF = \min(-FA^F - CA^F + CL^F + D^F + Eq^F, 0), \quad (4)$$

где CF – денежный поток (Cash Flow); FA – внеоборотные активы; CA – оборотные активы; CL – кредиторская задолженность; D – долг; Eq – собственный капитал.

Величина нового долга определяется из условия неотрицательности остатков денежных средств

$$CF^F \geq 0.$$

2. Исходные данные

Структура финансирования предприятий обычной промышленности и научных разработок значительно отличается друг от друга. В работе рассмотрены данные финансовой отчетности организаций из открытых источников Росстата [7]. Некоторые данные приведены в табл. 1 и на рис. 1. Данные организаций научных разработок приведены согласно выборке по ОКВЭД-2 «Научные исследования и разработки в области естественных и технических наук прочие (72.19)». Выделено 243 предприятия с выручкой более 800 млн руб. в 2018 г. с представленной отчетностью с 2015 г.

В качестве обычной промышленности рассмотрены аналогичные выборки по кодам ОКВЭД-2 «25. Производство металлических изделий» (240 предприятий), «27. Производство электрического оборудования» (259 предприятий), «28. Производство прочих машин и оборудования» (292 предприятия).

Управление в социально-экономических системах

При проведении анализа были исключены отдельные предприятия с выпадающими характеристиками финансовой отчетности (резкие изменения выручки, прибыли, активов).

Нормированный собственный оборотный капитал (на рубль выручки) по отраслям составляет 57 % для научных разработок и 12–18 % – для обычной промышленности (см. рис. 1).

Информация некоторых отраслей промышленности

Таблица 1

Table 1

Information from some industries

Показатель	25. Производство металлических изделий	27. Производство электрического оборудования	28. Производство прочих машин и оборудования	72. Научные исследования и разработки
Кол-во организаций, шт.	240	259	292	243
Выручка 2018 г., млрд руб.	592	818	874	1140
Чистая прибыль 2018 г., млрд руб.	21	36	32	66
Активы 2018 г., млрд руб.	589	581	1062	2837
Собственный оборотный капитал 2018 г., млрд руб.	70	147	205	649
Нормированный собственный оборотный капитал, %	11,9	18,0	10,7	57,0
Среднегодовой рост выручки (2015–2018), %	14,3	12,1	12,5	8,5
Рентабельность, %	3,6	4,4	3,7	5,8



Рис. 1. Оборотный капитал некоторых отраслей
Fig. 1. Working capital of some industries

Содержательно процедура финансирования предприятий научных разработок включает фиксированный заказ, длительный срок изготовления продукции (средний срок – 238 дней), большую дебиторскую задолженность, в том числе за счет авансирования поставщиков (средний срок – 291 день), большую кредиторскую задолженность, в том числе за счет полученных авансов (средний срок – 425 дней), практическую невозможность срыва сроков заказов. Финансирование гражданской продукции несколько отличается: неопределенность (волатильность) спроса, относительно короткие сроки изготовления, постоплата, допустимость переносов заказов.

На рис. 2 видно, что капиталоемкость (отношение активов к выручке) отрасли «Научные исследования...» в разы больше, чем в отраслях гражданской продукции. Для наглядности активы показаны как положительные значения, пассивы – как отрицательные.

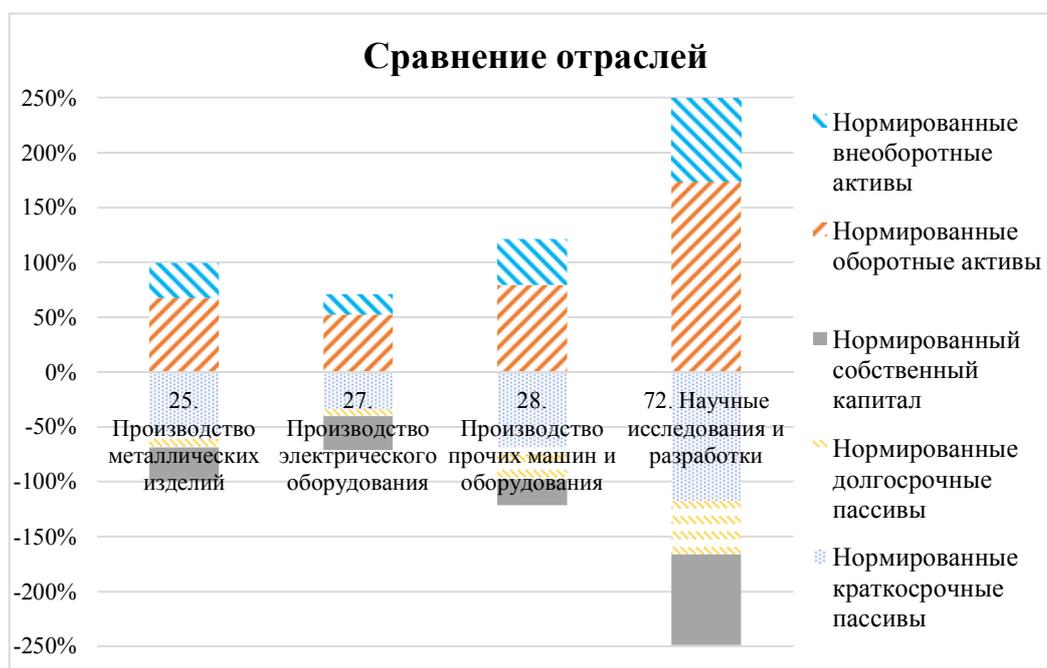


Рис. 2. Структура финансирования некоторых отраслей
Fig. 2. Financing structure of some industries

Также отметим, что темпы роста выручки обычной промышленности выше (12–14 %) за 2015–2018 гг., чем в научных исследованиях (8,5 %).

Для «зрелых» организаций характерны типовые, инерционные процессы. В производственном и управленческом процессах устоялись технологии и бизнес-процессы. С точки зрения моделирования зависимости изменения отдельных показателей при изменении (росте) выручки можно ожидать высокую корреляцию (зависимость) показателей от выручки (с большим R^2).

Так, прирост внеоборотных активов от прироста выручки для научно-технических предприятий (индекс 1) характеризуется $k_{1,ВНА} = 0,646$ при $R^2 = 0,954$, для оборотных активов коэффициент прироста $k_{1,ОА} = 2,182$ при $R^2 = 0,984$. Для выбранной отрасли гражданской продукции (индекс 2) $k_{2,ВНА} = 0,262$ при $R^2 = 0,913$, $k_{2,ОА} = 0,695$ при $R^2 = 0,967$.

3. Рассмотренный сценарий

Сценарий проведения расчетов существенно определяет результаты и выводы. В данной работе рассмотрен следующий сценарий изменения параметров модели при прогнозировании:

- рост выпуска научно-технической продукции с прежним темпом – 8,5 % в год;
- задан начальный уровень гражданской продукции в 2020 г. – 20 %;
- опережающий рост гражданской продукции для достижения целевых показателей – 24,7 % в год;
- сохранение удельной себестоимости продукции, постоянство административных расходов;
- сохранение длительности бизнес-процессов;
- сохранение темпов инвестиционной программы.

Для того чтобы доля гражданской продукции с 20 % в 2020 г. достигла 30 % в 2025 г. и 50 % в 2030 г., она должна увеличиваться опережающими темпами по отношению к продукции научных исследований. Если выручка научных исследований увеличивается на 8,5 % в год, то гражданская продукция должна увеличиваться со среднегодовым темпом роста около 20 % в 2020–2025 гг. и 27–30 % в 2026–2030 гг. Отметим, что это вдвое превышает темпы роста гражданской продукции в традиционных отраслях и это задача – вызов.

4. Результаты расчетов

Оценка объемов прироста гражданской продукции для достижения поставленных целевых показателей для отрасли научных исследований и разработок приведена в табл. 2. Для оценки параметров гражданской продукции использованы исходные данные по коду ОКВЭД-2 «25. Производство металлических изделий».

Оценка прироста объема гражданской продукции

Таблица 2

Table 2

Assessment of the increase in the volume of civilian products

Показатель	2020 г.	2025 г.	2030 г.	За период 2021–2030 гг.
Выручка, суммарно, млрд руб.	1343	2311	4874	27 733
Продукция научных исследований, млрд руб.	1074	1618	2437	17 328
Гражданская продукция, млрд руб.	269	693	2437	10 405
Прирост гражданской продукции к 2020 г., млрд руб.		425	2169	7720
Доля научных исследований, %	80	70	50	
Доля гражданской продукции, %	20	30	50	
Прирост доли гражданской продукции, %	0	10	30	

В расчетах принято, что финансирование инвестиций производится из нераспределенной прибыли, дополнительных кредитов и амортизации.

Результаты расчетов приведены в табл. 3. Оценка потребности в инвестировании оборотных и внеоборотных активов для прироста научно-технической продукции составляет в среднем 160 млрд руб. в год до 2025 г. и 200 млрд руб. в год в период 2026–2030 гг., суммарно около 2031 млрд руб. Данная потребность в финансировании покрывается нераспределенной прибылью 524 млрд руб., кредитами 882 млрд руб. и амортизацией.

Оценка потребности в инвестировании оборотных и внеоборотных активов для роста гражданской продукции составляет в среднем 50 млрд руб. до 2025 г. и 210 млрд руб. в период 2026–2030 гг., суммарно 1292 млрд руб. Данная потребность в финансировании покрывается нераспределенной прибылью 644 млрд руб. и кредитами 345 млрд руб. за период, а также амортизацией.

Результаты модельных расчетов, 2021–2030 гг., млрд руб.

Таблица 3

Table 3

Results of model calculations, 2021–2030, billion rubles

Показатель	Научно-техническая	Гражданская	Суммарно
Выручка	17 279	10 372	27 651
Чистая прибыль	819	1007	1826
Нераспределенная прибыль	524	644	1168
Дивиденды	295	362	657
Потребность в инвестициях	2031	1292	3322
Инвестиции в оборудование	874	565	1439
Прирост чистого оборотного капитала	1157	727	1883
Поступление денег от кредита	882	345	1227

5. Задача управления

Приведенный расчет осуществлен в сценарии инерционного роста, без повышения эффективности. «Запуск» внутренних мероприятий по повышению эффективности [7–9] позволит в разы сократить потребность в финансировании.

Опыт разработки и реализации программ и мероприятий повышения эффективности описан, но пока недостаточно широко используется в научной литературе [10–12].

Пусть управление отдельными показателями расходов и активов U состоит в обеспечении повышения эффективности на U_G для G -го показателя.

Тогда модель прогнозирования показателей G выглядит следующим образом:

$$G_m^F = G_m^0 + (k_G - U_G) \Delta S - C_U.$$

Для данной работы затраты на управление показателями C_U будем считать пренебрежимо малыми для относительно малых U_G . Опыт разработки и реализации программ реформирования и повышения эффективности российских организаций [13–16] показывает высокую эффективность реализации этих мероприятий и допустимость такого подхода.

Результаты модельных расчетов приведены ниже при последовательном сокращении затрат на 0,1 % в год и сокращении срока оборачиваемости на 1 % в год:

– по научно-технической продукции потребность в инвестициях сокращается до 1616 млрд руб., нераспределенная прибыль увеличивается до 650 млрд руб., потребность в кредитах – до 366 млрд руб.

– по гражданской продукции потребность в инвестициях сокращается до 1113 млрд руб., нераспределенная прибыль увеличивается до 703 млрд руб., потребность в кредитах – до 138 млрд руб.

Для реализации задачи роста продаж гражданской продукции необходимо рассмотреть другие факторы управления предприятием: систему продаж гражданской продукции, кадровое обеспечение, разработку и дизайн продукции, сервис, распределение ресурсов между военной и гражданской продукцией и другие. Без учета этих факторов риски нереализации поставленной задачи возрастают.

Таким образом, относительно небольшое, но последовательное по годам и реализуемое на практике повышение эффективности позволяет в разы сократить зависимость от внешнего финансирования.

6. Сценарий замещения выпуска продукции

Увеличение выпуска гражданской продукции может служить комплексом мероприятий для поддержания суммарного выпуска продукции на предприятиях научно-технического профиля.

Исходя из этого, возникает вопрос: какой должен быть темп роста научно-технической и гражданской продукции, чтобы сохранялись прежние среднегодовые темпы роста выручки? Ответ: среднегодовой темп роста научно-технической продукции должен составить 3,6 %, гражданской – 19,0 %.

Для этого сценария потребность в инвестициях 627 млрд руб. для обеспечения роста научно-технической продукции покрывается нераспределенной прибылью и амортизацией, дополнительные кредиты не нужны. Потребность в инвестициях 689 млрд руб. для обеспечения роста гражданской продукции покрывается прежде всего нераспределенной прибылью и амортизацией, дополнительные кредиты нужны в относительно небольшом объеме – 81 млрд руб.

Таким образом, «замещающий рост» потребует значительно меньшего финансирования.

Заключение

Результаты данного исследования могут быть использованы для разработки программ развития промышленности как на уровне отрасли, так и на уровне отдельных предприятий.

Для оценки объема финансирования применяется имитационная модель прогнозирования финансового состояния предприятия и/или группы предприятий.

Задача увеличения доли гражданской продукции до 50 % к 2030 г. на научно-технических предприятиях России потребует значительного дополнительного финансирования, оценка – около 1300 млрд руб. без программы повышения эффективности предприятий.

Комплекс мероприятий по повышению эффективности деятельности предприятий значительно сокращает потребность в дополнительном финансировании.

При снижении темпов роста выручки потребность в инвестициях уменьшается в разы.

Проведенное исследование открывает целый спектр дополнительных вопросов.

– Какие нефинансовые факторы будут определять (и сдерживать) продажу гражданской продукции на конкурентных рынках.

– При сохранении темпов роста НТП гражданская продукция должна увеличиваться со среднегодовым темпом роста около 25 %. Бурный рост продукции гражданского назначения и увеличение ее объема до 2,4 трлн руб. приведет к значительной конкуренции с традиционными отраслями промышленности, что может быть темой отдельных исследований.

Литература

1. Послание Президента РФ Федеральному собранию от 01.12.2016. – http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207978/ (дата обращения: 08.09.2020).
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: моногр. / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 410 с.
4. Ковалев, В.В. Финансовый менеджмент: теория и практика / В.В. Ковалев. – М.: Проспект, 2014. – 1094 с.
5. Дранко, О.И. Модель финансового прогнозирования и сценарии внутренних инвестиций / О.И. Дранко // Проблемы управления. – 2007. – № 1. – С. 37–40.
6. Дранко, О.И. Формирование программы инновационного развития: управление стоимостью / О.И. Дранко, З.А. Отарашвили, Д.В. Сушков // Проблемы управления. – 2012. – № 6. – С. 26–31.
7. Бухгалтерская (финансовая) отчетность предприятий и организаций за 2018 год. – М., 2020. – <https://www.gks.ru/opendata/7708234640-7708234640bdboo2018> (дата обращения: 10.03.2020).
8. Бирюков, С.Е. От стратегии выживания к стратегии активного развития (практика реформирования и финансового оздоровления ОАО «Владимирский завод «Электроприбор»). Из опыта управленческого консультирования / С.Е. Бирюков, С.В. Хайниши. – М.: МНИИПУ, 2001. – 196 с.
9. Ириков, В.А. Целостная система государственно-частного управления инновационным развитием как средство удвоения темпов выхода России из кризиса и посткризисного роста / В.А. Ириков, Д.А. Новиков, В.Н. Тренёв. – М.: ИПУ РАН, 2009. – 220 с.
10. Голов, О.Е. Инструменты и примеры повышения результативности и эффективности управления согласованным развитием региона и отраслей / О.Е. Голов, В.А. Ириков. – Уфа: Изд-во «Белая река», 2015. – 137 с.
11. Балашов, В.Г. Технологии повышения финансового результата: Практика и метод / В.Г. Балашов, В.А. Ириков. – 2-е изд. – М.: МЦФЭР, 2009. – 672 с.
12. Дранко, О.И. Технология экспресс-анализа больших массивов данных по оборотным активам промышленных предприятий / О.И. Дранко, О.В. Логиновский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 86–102. DOI: 10.14529/ctcr190208
13. Буркова, И.В. Оптимизация программы развития региона по стоимости / И.В. Буркова, О.И. Дранко, В.В. Зубарев // Экономика и менеджмент систем управления. – 2011. – Т. 1, № 1. – С. 28–36.
14. Горидько, Н.П. Инновационные векторы экономического роста северных регионов: возможности, оценки, прогнозы: науч. моногр. / Н.П. Горидько, Р.М. Нижегородцев, В.А. Цукерман. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2013. – 199 с.
15. Дранко, О.И. Метод «Затраты – эффективность» как инструмент выбора приоритетных проектов предприятий / О.И. Дранко, В.А. Ириков // Управленческий учет. – 2011. – № 4 – С. 15–20.
16. Кузовкин, А.И. Прогноз энергоёмкости ВВП России и развитых стран на 2020 г. / А.И. Кузовкин. – <http://ecfor.ru/publication/prognoz-energoemkosti-vvp-rossii-i-razvityh-stran-na-2020-g/> (дата обращения: 06.09.2020).

Дранко Олег Иванович, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва; olegdranko@gmail.com.

Поступила в редакцию 5 октября 2020 г.

FORECASTING OF FINANCING OF ENTERPRISE CONVERSION

O.I. Dranko, olegdranko@gmail.com

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

Purpose of the study. The task set by the President of Russia to increase the output of civilian products at the enterprises of the defense complex to 50% in 2030 requires the study of various necessary resources, as well as models and methods of managing them. In the context of the economic crisis caused by the coronavirus in 2020, the relevance of studying the possibilities of achieving this significant task is increasing. In this work, the goal is to develop a mathematical model, conduct modeling and assess the need for financing the growth of civilian output at enterprises in the research and development industry. **Methods.** A simulation model for multi-period forecasting of the financial state of the enterprise is used. Methods of processing big data are used to obtain the initial information. The means of regression analysis are used to determine the dependencies of the financial statements. Scenario analysis methods allow us to consider and highlight the significant factors influencing the research goal. **Results.** A multi-period model of forecasting the financial and economic state of an enterprise has been developed to assess the consequences of an increase in civilian production at enterprises of scientific research and development. The initial data of financial statements based on open data from Russian Agency for Statistics (Rosstat) were obtained, and the aggregation of reporting indicators was carried out. Simulation calculations were carried out in the scenarios of inertial growth, growth with an increase in efficiency, and replacement growth. The task of increasing the share of civilian products to 50% by 2030 at scientific and technical enterprises in Russia will require significant additional funding, an estimate of about 1,300 billion rubles in an inertial scenario. The development and implementation of a program to improve the efficiency of enterprises significantly reduces the need for additional financing, the estimate is about 1,100 billion rubles with a slight improvement in efficiency parameters. **Conclusion.** The results of this study can be used to develop industrial development programs both at the industry level and at the level of individual enterprises. Increasing the output of civilian products will require significant funding. Development and implementation of operational efficiency programs of enterprises can significantly reduce the need for additional funding.

Keywords: simulation, forecasting, strategy, conversion, enterprise development, big data.

References

1. [Message of the President of the Russian Federation to the Federal Assembly]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207978/ (accessed 09.08.2020). (in Russ.)
2. Loginovskiy 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]. Moscow, INFRA-M Publ., 2020. 450 p.
3. Loginovskiy O.V., Burkov V.N., Burkova I.V., Gelrud Ya.D., Korennaya K.A., Maksimov A.A. *Upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy: monografiya* [Management of Industrial Enterprises: Strategies, Mechanisms, and Systems]. Moscow, INFRA-M Publ., 2018. 410 p.
4. Kovalev V.V. *Finansovyy menedzhment: teoriya i praktika* [Financial Management: Theory and Practice]. Moscow, Prospect Publ., 2014. 1094 p.
5. Dranko O.I. [Model of financial Forecasting and Scenarios of Internal Investments]. *Control Management*, 2007, no. 1, pp. 37–40. (in Russ.)
6. Dranko O.I., Otarashvili Z.A., Sushkov D.V. [Formation of the Program of Innovative Development: Value Management]. *Control Management*, 2012, no 6, pp. 26–31. (in Russ.)
7. [Accounting (Financial) Statements of Enterprises and Organizations for 2018]. Available at: <https://www.gks.ru/opendata/7708234640-7708234640bboo2018> (accessed 03.10.2020). (in Russ.)
8. Biryukov S.E., Hainish S.V. *Ot strategii vyzhivaniya k strategii aktivnogo razvitiya (praktika reformirovaniya i finansovogo ozdorovleniya OAO «Vladimirskiy zavod «Elektropribor»)*. *Iz opyta*

upravlencheskogo konsul'tirovaniya. [From a Survival Strategy to a Strategy of Active Development (the Practice of Reforming and Financial Recovery of JSC Vladimirsky Zavod Elektropribor). From the Experience of Management Consulting]. Moscow, MNIIPU Publ., 2001. 196 p.

9. Irikov V.A., Novikov D.A., Trenev V.N. *Tselostnaya sistema gosudarstvenno-chastnogo upravleniya innovatsionnym razvitiyem kak sredstvo udvoeniya tempov vykhoda Rossii iz krizisa i post-krizisnogo rosta* [A Holistic System of Public-Private Management of Innovative Development as a Means of Doubling the Pace of Russia's Exit from the Crisis and Post-Crisis Growth]. Moscow, Publishing House of the Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 2009. 220 p.

10. Golov O.E., Irikov V.A. *Instrumenty i primery povysheniya rezul'tativnosti i effektivnosti upravleniya soglasovannym razvitiyem regiona i otrasley* [Tools and Examples of Increasing the Effectiveness and Efficiency of Managing the Coordinated Development of the Region and Industries]. Ufa, Publishing House "White River", 2015. 137 p.

11. Balashov V.G., Irikov V.A. *Tekhnologii povysheniya finansovogo rezul'tata: Praktika i metod* [Technologies for Enhancing Financial Results: Practice and Method]. Moscow, International Center for Financial and Economic Development Publ., 2009. 672 p.

12. Dranko O.I., Loginovskiy O.V. Technology Express Analysis of Large Massives of Data on Reversible Assets of Industrial Enterprises. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 86–102. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190208

13. Burkova I.V., Dranko O.I., Zubarev V.V. [Optimization of the Regional Development Program at a Cost]. *Economics and Management Systems Management*, 2011, vol. 1, no. 1, pp. 28–36. (in Russ.)

14. Goridko N.P., Nizhegorodtsev R.M., Tsukerman V.A. *Innovatsionnyye vektory ekonomicheskogo rosta severnykh regionov: vozmozhnosti, otsenki, prognozy: nauchnaya monografiya* [Innovative Vectors of Economic Growth of the Northern Regions: Opportunities, Estimates, and Forecasts: Scientific monograph]. Apatity, Publishing House of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2013. 199 p.

15. Dranko O.I., Irikov V.A. [The "Cost – Effectiveness" Method as a Tool for Selecting Priority Projects of Enterprises]. *Management Accounting*, 2011, no. 4, pp. 15–20. (in Russ.)

16. Kuzovkin A.I. [The Forecast of Energy Intensity of Russia's GDP and Developed Countries for 2020]. Available at: <http://ecfor.ru/publication/prognoz-energoemkosti-vvp-rossii-i-razvityh-strana-2020-g/> (accessed 03.10.2020). (in Russ.)

Received 5 October 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Дранко, О.И. О прогнозировании финансирования конверсии предприятий / О.И. Дранко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 74–82. DOI: 10.14529/ctcr200408

FOR CITATION

Dranko O.I. Forecasting of Financing of Enterprise Conversion. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 74–82. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200408

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ СОГЛАСОВАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФИНАНСОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ ОБЪЕДИНЕНИЯ ХОЗЯЙСТВУЮЩИХ СУБЪЕКТОВ

Ю.В. Бондаренко^{1,2}, Азиз Аммар Имад¹,
Е.В. Васильчикова², О.В. Бондаренко¹

¹ Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия,

² Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Введение. Характерной чертой развития современных экономических систем является активное объединение, интеграция предприятий в более крупные хозяйствующие субъекты. Отличительной особенностью таких объединений является разнонаправленность интересов его участников. Разработка инновационных механизмов управления финансами интегрированной структуры, позволяющих учесть противоречивые интересы предприятий объединения, является актуальной задачей. **Цель исследования.** Разработать математические модели и алгоритмы, позволяющие повысить эффективность управления финансовыми средствами объединения хозяйствующих субъектов за счет формирования оптимального пакета проектов и согласованного распределения прибыли от его реализации между предприятиями. **Материалы и методы.** Предлагаемый подход основывается на использовании методов системного анализа, методов оптимизации, теории принятия решений и теории игр. В работе рассматривается механизм согласованного распределения средств предприятий объединения при реализации проектов, состоящий из двух укрупненных этапов. На первом этапе формируется оптимальный пакет проектов объединения. Каждое предприятие объединения предлагает собственные варианты проектов, из множества которых формируется пакет проектов. Построенная модель формирования пакета проектов, обеспечивающего объединению получение наибольшей прибыли, является задачей о ранце и решается методом ветвей и границ. На втором этапе осуществляется распределение прибыли от реализации проектов между предприятиями объединения. Для отыскания распределения прибыли, обеспечивающего согласование экономических интересов предприятий объединения, предлагается использовать методы и принципы теории кооперативных игр. В работе показано, что описанную задачу можно формально представить в виде игры в форме характеристической функции. В качестве согласованного распределения прибыли предлагается выбрать определенный элемент S -ядра. Формирование данного элемента осуществляется на основе оптимизационной модели, в функции цели и системе ограничений которой учитываются количественные показатели активности участия предприятий в реализации проектов объединения. **Результаты.** Разработан механизм согласованного распределения финансовых средств предприятий объединения при реализации проектов, основанный на математических моделях и методах. Особенностью механизма является применение игрового принципа при распределении прибыли проектов. Проведены практические расчеты, обосновывающие преимущества представленного подхода по сравнению с известными методами. **Заключение.** Предлагаемое в работе согласованное распределение финансов обоснованно обеспечивает выгоду каждому предприятию от совместной реализации проектов и стимулирует руководства предприятий к поиску высокоэффективных проектов.

Ключевые слова: объединение хозяйствующих субъектов, проект, согласование, распределение финансов, математическая модель.

Введение

Современные предприятия функционируют в достаточно сложных условиях внешней среды, основными характеристиками которой являются нестабильность, неопределенность, различные политические, демографические и социально-экономические вызовы. Добиться конкурентных преимуществ, инвестиционной привлекательности, высоких экономических и финансовых результатов предприятиям позволяет их объединение в более крупные хозяйствующие субъекты – холдинги, финансово-промышленные группы, концерны, некоммерческие партнерства, ассоциации, консорциумы и т. п. [1–5].

В литературе в самом общем смысле объединение хозяйствующих субъектов (или интегрированный хозяйствующий субъект) принято рассматривать как группу предприятий или организаций, функционирующих на основе общих целей и системы управления [6]. Координация действий предприятий в таких структурах выходит за рамки обычных контрактов. Вместе с тем, как правило, сохраняется статус партнеров по группе как отдельных хозяйствующих субъектов, обладающих собственными целями и задачами [4, 6].

Одной из важнейших функциональных обязанностей управляющего центра интегрированного хозяйствующего субъекта является эффективное управление финансовыми средствами в направлении достижения экономических результатов как объединения в целом, так и каждого его предприятия. При этом руководство каждого отдельного предприятия заинтересовано, в первую очередь, в успешном развитии собственного хозяйствующего субъекта и получении наибольшей доли в совокупной прибыли. Именно поэтому процесс распределения прибыли от реализации проектов, совместно финансируемых предприятиями объединения, носит конфликтный характер [7]. Поиск инновационных механизмов распределения финансов при реализации проектов, обеспечивающих учет и согласование интересов всех участников, является актуальной задачей, решение которой невозможно без привлечения математического инструментария.

Вопросы распределения ресурсов, в том числе финансовых средств, неоднократно становились предметом научных исследований российских и зарубежных ученых. Формированию механизмов распределения ресурсов в активных системах посвящены многочисленные исследования Д.А. Новикова, В.Н. Буркова и др. [8, 9]. Вопросы распределения ресурсов при реализации проектов исследованы в работах С.А. Баркалова, П.Н. Курочки, А.В. Щепкина и др. [10, 11]. В работах Ж. Тироля, П. Болтона, Е. Берлингер, А. Ловас рассматриваются вопросы управления корпоративными финансами и согласования интересов в теории контрактов [12–14]. Теоретической основой математического подхода к согласованию противоречивых интересов агентов служат работы в области теории игр [15–17]. Общий подход и механизмы согласования социальных показателей развития региона и экономических показателей деятельности хозяйствующих субъектов описаны в исследованиях И.В. Горошко, Ю.В. Бондаренко и др. [18, 19]. Алгоритмы согласования интересов между предприятиями финансово-промышленной группы при формировании плана нововведений представлены в работе Б.И. Кузина, В.Н. Юрьева, Г.М. Шахдинарова [7].

В настоящей работе рассматривается объединение хозяйствующих субъектов, включающее управляющий центр и предприятия. Каждое предприятие располагает некоторыми финансовыми средствами, которые оно планирует инвестировать в проекты. На основе этой информации управляющий центр должен:

- сформировать оптимальный пакет проектов объединения, обеспечивающий наибольшую прибыль;
- предложить алгоритм (принцип) последующего распределения общей прибыли между предприятиями, обеспечивающий учет и согласование их интересов.

В основу предлагаемого в настоящей работе подхода к согласованному распределению финансов при реализации проектов объединения положена идея формального сведения задачи к игре в форме характеристической функции. В качестве согласованного распределения общей прибыли от реализации проектов предлагается рассматривать определенный элемент S -ядра. Для формирования данного элемента разработана математическая модель, функция цели и система ограничений которой позволяют управляющему центру учесть активность предприятий и стимулировать их к ее повышению. Предлагаемый подход, в отличие от известных, делает выгодным каждому предприятию активное участие в совместной реализации проектов всего объединения.

Разработанный программный продукт позволяет внедрить предлагаемый подход в практическую деятельность предприятий.

1. Описание подхода

Рассмотрим некоторый интегрированный хозяйствующий субъект, структура которого включает управляющий центр и n предприятий.

Каждое предприятие i располагает собственными средствами $K_i \geq 0$, которые оно может самостоятельно инвестировать в m_i проектов. В качестве таких проектов могут выступать, на-

пример, проекты нововведений на самом предприятии [7], а их множество обозначим как $P^i = \{P_1^i, P_2^i, \dots, P_{m_i}^i\}$. Полагаем, что все проекты рассчитаны на один и тот же период времени (например, один год) и известна выгода (прибыль) Π_{ij} , которую ожидается получить от реализации проекта j , где $j=1, \dots, m_i$. Затраты на реализацию проекта j обозначим как c_j^i .

Будем полагать, что предприятие i может передать в распоряжение управляющей компании (в централизованный фонд) свои финансовые средства в объеме K_i и перечень проектов P^i .

В этом случае совокупные финансовые средства объединения составят величину $K = \sum_{i=1}^n K_i$, а

множество проектов объединения

$$P = \{P^1, P^2, \dots, P^n\} = \{P_1^1, \dots, P_{m_1}^1, \dots, P_1^n, \dots, P_{m_n}^n\}.$$

Задача управляющего центра – предложить руководителям предприятий механизм распределения доступных финансовых средств, обеспечивающий получение наибольшей совокупной прибыли объединения и согласованное распределение полученной от реализации проектов прибыли между предприятиями.

Предлагаемый в настоящей работе механизм согласованного распределения средств предприятий объединения на реализацию проектов будем рассматривать в разрезе двух укрупненных этапов.

Этап 1. Формирование оптимального пакета проектов.

Этап 2. Согласованное распределение совокупной прибыли объединения.

На первом этапе формируется оптимальный пакет проектов, доступный по финансовым средствам и обеспечивающий наибольшее значение прибыли объединения. Реализацию данного этапа предлагается осуществлять на основе оптимизационной задачи.

Введем в рассмотрение следующие бинарные переменные:

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если проект } P_j^i \text{ включается в пакет,} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Задача формирования оптимального пакета проектов имеет следующий вид:

$$f(y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \Pi_{ij} y_{ij} \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} c_j^i \cdot y_{ij} \leq K, \quad (2)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m_i. \quad (3)$$

Задача (1)–(3) представляет собой задачу о ранце и может быть решена методом ветвей и границ. На основе полученных оптимальных значений переменных $y^* = (y_{11}^*, \dots, y_{1m_1}^*, \dots, y_{n1}^*, \dots, y_{nm_n}^*)$ формируется оптимальный пакет проектов объединения $P^* = \{P_j^i \in P \mid y_{ij}^* = 1\}$, а также рассчитывается максимальный размер прибыли объединения $f^* = f(y^*)$.

Следующим этапом предлагаемого механизма является распределение финансовых средств объединения f^* между предприятиями, обеспечивающее учет их вложений, интересов и возможностей. При этом каждое предприятие i получает величину

$$\tilde{\Pi}_i = K_i + \tilde{f}_i, \quad (4)$$

где $\tilde{f}_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^n \tilde{f}_i = f^*$.

Слагаемое \tilde{f}_i в формуле (4) представляет собой тот размер прибыли, который получает предприятие из общей прибыли объединения, и определение его конкретного значения составляет основную проблему второго этапа механизма согласованного распределения средств.

Обозначим через $\tilde{f} = (\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \dots, \tilde{f}_n)$ искомый набор (вектор) распределения предприятиям прибыли объединения от реализации проектов.

Будем говорить, что \tilde{f} является согласованным распределением прибыли, если выполняются следующие условия:

1) $\tilde{f}_i \geq f_i^*$, где f_i^* – размер прибыли, которую могло бы получить предприятие i , самостоятельно инвестируя собственные средства в собственные проекты;

$$2) \sum_{i=1}^n \tilde{f}_i = f^*.$$

В рамках понятий теории игр первое из условий можно обозначить как условие индивидуальной рациональности предприятий объединения, второе – условие коллективной рациональности.

Для определения максимального размера прибыли предприятия, необходимого для учета условия индивидуальной рациональности, управляющему центру предлагается решить для каждого предприятия i (где $i = 1, \dots, n$) следующую задачу формирования оптимального пакета проектов:

$$f_i(x^i) = \sum_{j=1}^{m_i} \Pi_{ij} x_{ij} \rightarrow \max, \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^{m_i} c_j^i \cdot x_j^i \leq K_i, \quad (6)$$

$$x_j^i \in \{0, 1\}, j = 1, \dots, m_i. \quad (7)$$

Переменные модели x_j^i являются бинарными и принимают следующие значения:

$$x_j^i = \begin{cases} 1, & \text{если проект } P_j^i \text{ включается в пакет проектов предприятия,} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Аналогично задаче (1)–(3) задача (5)–(7) является задачей о ранце. Решением (5)–(7) является вектор $(x^i)^* = \left((x_1^i)^*, \dots, (x_{m_i}^i)^* \right)$, на основе которого формируется оптимальный пакет проектов

i -го предприятия $P_i^* = \left\{ P_j^i \in P^i \mid (x_j^i)^* = 1 \right\}$ и рассчитывается оптимальное значение функции цели

$f_i^* = f\left((x^i)^*\right)$ – максимальный размер прибыли, которую может получить предприятие i при реализации собственных проектов собственными средствами.

Заметим, что вектор $x^* = \left((x^1)^*, \dots, (x^n)^* \right)$, полученный на основе решений n задач (5)–(7), является допустимой точкой задачи (1)–(3), поэтому выполняется следующее неравенство

$$f^* \geq f_1^* + f_2^* + \dots + f_n^*, \quad (8)$$

что обеспечивает существование согласованного распределения прибыли \tilde{f} .

Тогда каждое предприятие получает следующий размер выплат

$$\tilde{f}_i = f_i^* + \Delta_i,$$

где Δ_i – величина надбавки, $\Delta_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^n \Delta_i = f^* - \sum_{i=1}^n f_i^*$.

Если при этом выполняется равенство $f^* = \sum_{i=1}^n f_i^*$, то очевидно, что согласованное распределение прибыли означает, что $\tilde{f}_i = f_i^*$ для всех $i = 1, \dots, n$. В противном случае, если (8) выполняется

как строгое неравенство, величина надбавки хотя бы одного предприятия положительна. Для определения надбавок предприятиям, обеспечивающих согласование интересов, возможно использование одного из следующих принципов.

1. Принцип распределения пропорционально вложенным средствам.

В этом случае надбавка Δ_i рассчитывается по формуле

$$\Delta_i = \frac{K_i}{\sum_{i=1}^n K_i} \cdot \left(f^* - \sum_{i=1}^n f_i^* \right).$$

Соответственно, каждое предприятие получает следующий объем средств

$$\tilde{f}_i = f_i^* + \frac{K_i}{\sum_{i=1}^n K_i} \cdot \left(f^* - \sum_{i=1}^n f_i^* \right). \quad (9)$$

2. Принцип распределения пропорционально остаточным средствам.

В этом случае для каждого предприятия на основе решения задачи (5)–(7) рассчитывается объем денежных средств, затрачиваемых на реализацию оптимального пакета проектов:

$$K_i^* = \sum_{j=1}^{m_i} c_j^i \cdot (x_j^i)^*, \quad i = 1, \dots, n.$$

Тогда финансовые средства в объеме $\Delta K_i = K_i - K_i^*$ каждого предприятия, передаваемые в централизованный фонд, не участвуют в формировании прибыли непосредственно самого предприятия.

В этом случае надбавку Δ_i предлагается рассчитывать по следующей формуле

$$\Delta_i = \frac{\Delta K_i}{\sum_{i=1}^n \Delta K_i} \cdot \left(f^* - \sum_{i=1}^n f_i^* \right).$$

Согласованное распределение прибыли объединения имеет следующий вид

$$\tilde{f}_i = f_i^* + \frac{\Delta K_i}{\sum_{i=1}^n \Delta K_i} \cdot \left(f^* - \sum_{i=1}^n f_i^* \right). \quad (10)$$

Описанные выше принципы являются простыми, достаточно изученными в литературе [7], но вместе с тем обладают существенными недостатками. Согласно первому принципу (9) в более выгодном положении оказываются предприятия, которые располагают большими средствами и предлагают менее прибыльные проекты [7]. Согласно второму принципу распределения прибыли (10) предприятиям выгодно рассматривать только высоко прибыльные проекты, оставляя часть денежных средств свободными. Может получиться, что у объединения окажется достаточно мало проектов для реализации и часть денежных средств не примет участие в формировании прибыли. Кроме того, возможно возникновение таких ситуаций (и это будет показано в практических расчетах), когда одному или нескольким предприятиям окажется не выгодным участие в реализации проектов всего объединения, что приведет к конфликтам.

Предлагаемый нами третий принцип основывается на научно обоснованных положениях теории кооперативных игр.

3. Игровой принцип распределения.

Конфликт интересов предприятий при распределении прибыли f^* формально представим в виде игры в форме характеристической функции [15, 16].

Для формирования характеристической функции рассмотрим множество индексов предприятий объединения: $I = \{1, 2, \dots, n\}$, а также всевозможные пустые подмножества этого множества (коалиции предприятий), число которых 2^n . Подмножество, включающее предприятия с номерами i_1, i_2, \dots, i_k , обозначим как $I_{i_1 i_2 \dots i_k}$.

Характеристическая функция V кооперативной игры определяется на множестве коалиций игроков, а ее значение на каждой коалиции $V(i_1, i_2, \dots, i_k)$ имеет смысл выигрыша, который может получить коалиция, действуя отдельно от остальных участников.

Основным свойством характеристической функции является выполнение условия супер-аддитивности

$$V(I_1 \cup I_2) \geq V(I_1) + V(I_2)$$

для любых двух непересекающихся коалиций I_1 и I_2 .

Для каждой коалиции предприятий рассмотрим задачу формирования оптимального пакета проектов коалиции:

$$f_{i_1 i_2 \dots i_k}(z) = \sum_{i \in I_{i_1 i_2 \dots i_k}} \sum_{j=1}^{m_i} \Pi_{ij} z_{ij} \rightarrow \max, \quad (11)$$

$$\sum_{i \in I_{i_1 i_2 \dots i_k}} \sum_{j=1}^{m_i} c_j^i \cdot z_{ij} \leq K_{i_1} + K_{i_2} + \dots + K_{i_k}, \quad (12)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\}, i \in I_{i_1 i_2 \dots i_k}; j = 1, \dots, m_i. \quad (13)$$

Оптимальное значение функции цели задачи (11)–(13) обозначим как $f_{i_1 i_2 \dots i_k}^*$. Данное значение обоснованно может быть принято как значение характеристической функции коалиции предприятий: $V(i_1, i_2, \dots, i_k) = f_{i_1 i_2 \dots i_k}^*$. В силу отмеченного нами ранее свойства решения задачи о ранце условие супераддитивности для построенной функции выполняется.

Тогда вектор согласованного распределения прибыли $\tilde{f} = (\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \dots, \tilde{f}_n)$ может быть найден как недоминируемый вектор S -ядра кооперативной игры, т. е. вектор, удовлетворяющий следующей системе уравнений и неравенств:

$$\begin{cases} \tilde{f}_i \geq f_i^*, i = 1, \dots, n; \\ \tilde{f}_{i_1} + \tilde{f}_{i_2} + \dots + \tilde{f}_{i_k} \geq f_{i_1 i_2 \dots i_k}^*, \quad \forall I_{i_1 i_2 \dots i_k} \subset I, \\ \tilde{f}_1 + \tilde{f}_2 + \dots + \tilde{f}_n = f^*. \end{cases} \quad (14)$$

Вектор выплат, являющийся решением системы (14), обеспечивает не только согласование интересов предприятий, но и стимулирует руководство предприятий к поиску проектов, обеспечивающих высокую прибыль. Более того, при таком распределении средств ни одной из коалиций предприятий не выгодно самостоятельно реализовывать свои проекты.

Заметим, что система (14) может иметь множество решений, каждое из которых является согласованным распределением прибыли. В этом случае возникает задача выбора единственного вектора \tilde{f} , который и будет принят как основа распределения прибыли объединения. Решение этой задачи предлагается осуществлять на основе следующего алгоритма.

Алгоритм согласованного распределения прибыли на основе игрового принципа

Шаг 1. Управляющий центр для каждого предприятия i формирует нижнюю $\underline{\Delta}_i$ и верхнюю $\overline{\Delta}_i$ границы стимулирующей надбавки Δ_i , где $\Delta_i \in [\underline{\Delta}_i, \overline{\Delta}_i]$.

Шаг 2. На основе анализа оптимального пакета проектов объединения эксперты управляющего центра определяют α_i – количественный показатель значимости вклада предприятия i в реализацию проекта, $\alpha_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$.

Шаг 3. Решение задачи формирования оптимального вектора согласованного распределения прибыли объединения с учетом значимости предприятий:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \frac{\Delta_i - \underline{\Delta}_i}{\Delta_i - \underline{\Delta}_i} \rightarrow \max, \quad (15)$$

$$\begin{cases} \tilde{f}_i \geq f_i^* + \Delta_i, i = 1, \dots, n; \\ \tilde{f}_{i_1} + \tilde{f}_{i_2} + \dots + \tilde{f}_{i_k} \geq f_{i_1 i_2 \dots i_k}^*, \quad \forall I_{i_1 i_2 \dots i_k} \subset I, \\ \tilde{f}_1 + \tilde{f}_2 + \dots + \tilde{f}_n = f^*, \\ \Delta_i \in [\underline{\Delta}_i, \overline{\Delta}_i]. \end{cases} \quad (16)$$

Задача (15), (16) является задачей линейного программирования и может быть решена симплекс-методом. Переменными модели являются \tilde{f}_i, Δ_i , где $i = 1, \dots, n$.

Рассчитанное как решение задачи (15), (16) согласованное распределение прибыли \tilde{f} удовлетворяет соотношению (14) и, следовательно, является элементом С-ядра кооперативной игры. Тем самым обеспечивается не только научно обоснованное согласование интересов предприятий объединения хозяйствующих субъектов, но и стимулирование руководителей к отысканию наиболее прибыльных проектов.

2. Практические расчеты

Для практической реализации алгоритма согласованного распределения финансов при реализации проектов объединения хозяйствующих субъектов разработан программный продукт. Программа написана на языке программирования С# в среде разработки Microsoft Visual Studio Enterprise 2015 версии 14.0.25431.01. Приведем пример практических расчетов.

Рассмотрим объединение хозяйствующих субъектов, включающее 3 предприятия. Первое и третье предприятие предлагают к реализации по 5 проектов, второе предприятие – 4 проекта. Проекты каждого предприятия, затраты на их реализацию, планируемая прибыль от реализации каждого проекта и финансовые средства каждого предприятия, выраженные в условных денежных единицах, представлены в табл. 1.

Начальные данные

Таблица 1

Initial data

Table 1

Предприятия	Проекты	Затраты на реализацию проекта, ден. ед.	Прибыль от реализации проекта, ден. ед.	Финансовые средства предприятия, ден. ед.
Предприятие 1	11	200	70	600
	12	250	64	
	13	120	18	
	14	300	120	
	15	150	18	
Предприятие 2	21	180	57,6	300
	22	250	75	
	23	100	25	
	24	200	36	
Предприятие 3	31	400	72	1000
	32	300	36	
	33	200	10	
	34	300	80	
	35	500	100	

Результаты решения оптимизационных задач формирования оптимального пакета проектов объединения (1)–(3) и каждого предприятия в отдельности (5)–(7) представлены в табл. 2.

Результаты решения задач формирования оптимальных пакетов проектов

Таблица 2

Table 2

Results of solving problems of forming optimal project packages

Предприятия	Оптимальный пакет проектов	Оптимальная прибыль	Затраты	Остаток неизрасходованных финансов
Предприятие 1	11, 14	190	500	100
Предприятие 2	21, 23	82,6	280	20
Предприятие 3	33, 34, 35	190	1000	0
Объединение	11, 12, 13, 14, 21, 22, 23, 24, 34	545,6	1900	1900

Как показали результаты расчетов, в оптимальный пакет проектов вошли 4 проекта Предприятия 1, 4 проекта Предприятия 2 и только один проект Предприятия 3.

Согласованным распределением прибыли является вектор $\tilde{f} = (\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \tilde{f}_3)$, координаты которого удовлетворяют условиям индивидуальной и коллективной рациональности: $\tilde{f}_1 \geq 190$, $\tilde{f}_2 \geq 82,6$, $\tilde{f}_3 \geq 190$, $\tilde{f}_1 + \tilde{f}_2 + \tilde{f}_3 = 545,6$.

Рассчитанные значения согласованного распределения прибыли по принципу пропорционально вложенным средствам (принцип 1) и по принципу пропорционально остаточным средствам (принцип 2) приведены в табл. 3.

Результаты расчетов для принципов 1 и 2

Таблица 3

Table 3

Calculation results for principles 1 and 2

Предприятия	Согласованное распределение прибыли, ден. ед.	
	Принцип 1	Принцип 2
Предприятие 1	216,20	259,17
Предприятие 2	95,70	96,43
Предприятие 3	233,68	190

Анализ проведенных расчетов показал, что по первому распределению Предприятие 3, представившее менее эффективные проекты, но большее количество финансовых средств, оказывается в более выгодном положении, чем Предприятие 1. С другой стороны, согласно второму принципу, Предприятие 3 не получает дополнительных средств, что делает для него невыгодным объединение.

Более того, как будет показано ниже, Предприятие 2 и Предприятие 3, объединив собственные средства и проекты, могут получить 312,6 единицы прибыли. Данная сумма превышает сумму средств, которые получают эти предприятия по второму принципу. Таким образом, данной коалиции невыгодно объединяться с Предприятием 1. Этот факт приводит к противоречиям и конфликту интересов. Можно показать, что данная конфликтная ситуация возможна и при распределении по первому принципу.

Избежать описанного выше конфликта интересов позволяет применение игрового принципа. Необходимые для формирования модели (15), (16) расчеты приведены в табл. 4.

Результаты расчетов для игрового принципа

Таблица 4

Table 4

Calculation results for the game principle

Коалиции предприятий	Оптимальный пакет проектов	Оптимальная прибыль, ден. ед.
Предприятие 1, Предприятие 2	11, 13, 14, 21, 23	290,6
Предприятие 1, Предприятие 3	11, 12, 14, 34, 35	434
Предприятие 2, Предприятие 3	21, 22, 34, 35	312,6

Выберем следующие значения коэффициентов значимости вклада предприятий в реализацию проекта: $\alpha_1 = 0,4$, $\alpha_2 = 0,5$, $\alpha_3 = 0,1$.

Выбранные интервалы изменения стимулирующей надбавки: $40 \leq \Delta_1 \leq 50$, $5 \leq \Delta_2 \leq 40$, $2 \leq \Delta_3 \leq 10$.

Модель (15), (16) принимает следующий вид:

$$0,4 \cdot \frac{\Delta_1 - 40}{10} + 0,5 \cdot \frac{\Delta_2 - 5}{35} + 0,1 \cdot \frac{\Delta_3 - 2}{8} \rightarrow \max,$$

$$\begin{cases} \tilde{f}_1 - \Delta_1 \geq 190, \tilde{f}_2 - \Delta_2 \geq 82,6, \tilde{f}_3 - \Delta_3 \geq 190, \\ \tilde{f}_1 + \tilde{f}_2 \geq 290,6, \tilde{f}_1 + \tilde{f}_3 \geq 434, \tilde{f}_2 + \tilde{f}_3 \geq 312,6, \\ \tilde{f}_1 + \tilde{f}_2 + \tilde{f}_3 = 545,6, \\ 40 \leq \Delta_1 \leq 50, 5 \leq \Delta_2 \leq 40, 2 \leq \Delta_3 \leq 8. \end{cases}$$

Решением задачи является следующее распределение прибыли:

$$\tilde{f}_1 = 233, \tilde{f}_2 = 111,6, \tilde{f}_3 = 201.$$

Полученный вектор распределения прибыли принадлежит С-ядру, т. е. является недоминируемым. При таком распределении всем предприятиям и коалициям выгодно объединяться для совместной реализации проектов. Учет коэффициентов значимости и интервалов стимулирующей добавки мотивирует предприятия к активному поиску эффективных проектов для объединения.

Заключение

В настоящей статье разработан механизм согласованного распределения финансовых средств при реализации проектов, основу которого составляют математические модели и методы. На первом этапе механизма предлагается модель формирования пакета проектов объединения, обеспечивающего получение наибольшей прибыли. На втором этапе осуществляется распределение прибыли между предприятиями объединения. Введено понятие согласованного распределения прибыли. На основе анализа недостатков известных принципов распределения средств сформирован алгоритм согласованного распределения прибыли на основе игрового принципа. Рассчитанное распределение обеспечивает предприятиям выгоду от объединения и мотивирует руководство к поиску предложений эффективных проектов. Теоретические выкладки подтверждаются проведенными программными расчетами. Разработанный программный продукт позволяет внедрить предлагаемый подход в деятельность предприятий. Обсуждение предлагаемых моделей и алгоритмов с руководителями ряда компаний г. Воронежа позволило сделать выводы о их практической ценности и определить направления дальнейшего развития.

Литература

1. Звягинцева, Е.В. Эффективность интегрированной структуры хозяйствующих субъектов / Е.В. Звягинцева // Вестник Тихоокеанского государственного экономического университета. – 2007. – № 2 (42). – С. 3–12.
2. Егорова, А.В. Интеграция хозяйствующих субъектов как синтезирующая закономерность / А.В. Егорова // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. – 2018. – № 4 (73). – С. 28–32.
3. Долгих, Е.Н. Формирование интегрированного пространства и интегрированной информационной среды инновационных хозяйствующих субъектов / Е.Л. Долгих, А.В. Семенихина // Экономические и гуманитарные науки. – 2019. – № 3 (326). – С. 97–108.
4. Кувшинов, М.С. Формирование механизма инновационного развития промышленной интегрированной структуры / М.С. Кувшинов, М.И. Бажанова. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2013. – 168 с.
5. Багаутдинова, Н.Г. Реализация потенциала интегрированного образования в системе стратегического управления предприятием / Н.Г. Багаутдинова, И.Ю. Орлов // Казанский экономический вестник. – 2015. – № 4 (18). – С. 27–37.

6. Закирова, Э.Р. Интегрированные хозяйствующие субъекты: вопросы управления и экономической безопасности / Э.Р. Закирова, К.В. Ростовцев // *Управленец*. – 2015. – № 6. – С. 18–24.
7. Кузин, Б.И. Методы и модели управления фирмой / Б.И. Кузин, В.Н. Юрьев, Г.М. Шахдинаров. – СПб.: Питер, 2001. – 432 с.
8. Новиков, Д.А. Теория управления организационными системами / Д.А. Новиков. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2007. – 584 с.
9. *Methodology and Technology of Control System Development* / V. Burkov, A. Shchepkin, V. Irikov, V. Kondratiev // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2019. – Vol. 181. – P. 29–38.
10. *Barkalov, S.A. Designing Systems Of Group Stimulation In The Management Of Energy Complex Objects* / S.A. Barkalov, V.N. Burkov, P.N. Kurochka // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2019. – Vol. 983. – P. 55–68.
11. *Barkalov, S.A. Model of Formation Plans For the Urban Areas Development* / S.A. Barkalov, P.N. Kurochka, M.A. Pinaeva // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Workshop “Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019”*. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – 2019. – P. 62035.
12. *Tirole, J. The Theory of Corporate Finance* / J. Tirole. – Princeton: Princeton University Press, 2006. – 645 p.
13. *Berlinger, E. State Subsidy and Moral Hazard in Corporate Financing* / E. Berlinger, A. Lovas, P. Juhasz // *CEJOR*. – 2017. – No. 25. – P. 743–770.
14. Болтон, П. Теория контрактов / П. Болтон, М. Деватрпоинт. – М.: Издат. дом «Дело» РАНХиГС, 2019. – 800 с.
15. Колокольцов, В.Н. Математическое моделирование многоагентных систем конкуренции и кооперации / В.Н. Колокольцов, О.А. Малафеев. – СПб.: Лань, 2012. – 624 с.
16. Харшаньи, Дж. Общая теория выбора равновесия в играх / Дж. Харшаньи, Р. Зельтен. – СПб.: Экономическая школа, 2001. – 424 с.
17. Астанин, С.В. Конфликтно-игровой подход к распределению ресурсов в организационной системе / С.В. Астанин, Н.К. Жуковская // *Прикладная информатика*. – 2011. – № 4 (34). – С. 125–132.
18. *Bondarenko, Y.V. The Task of Coordinating Social and Economic Indicators of the Development of the Region and the Mathematical Approach to Its Solution* / Y.V. Bondarenko, I.V. Goroshko, I.L. Kashirina // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1203. – P. 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/1203/1/012037
19. Бондаренко, Ю.В. Механизмы согласования показателей социально-экономического развития региона и роль органов внутренних дел в их реализации // Ю.В. Бондаренко, И.В. Горошко. – М.: Академия управления МВД России, 2015. – 128 с.

Бондаренко Юлия Валентиновна, д-р техн. наук, профессор кафедры математических методов исследования операций, Воронежский государственный университет; профессор кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, bond.julia@mail.ru.

Азиз Аммар Имад, аспирант кафедры математических методов исследования операций, Воронежский государственный университет, г. Воронеж; ammar.azeez548@gmail.com.

Васильчикова Екатерина Владимировна, аспирант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; evasiltikova@vgasu.vrn.ru.

Бондаренко Олег Владимирович, студент факультета прикладной математики, информатики и механики, Воронежский государственный университет, г. Воронеж; oleg.bondarenko.2000@list.ru.

Поступила в редакцию 25 августа 2020 г.

MODELS AND ALGORITHMS OF THE CONSISTENT FINANCIAL DISTRIBUTION IN THE IMPLEMENTATION OF PROJECTS OF THE ASSOCIATION OF BUSINESS ENTITIES

Yu.V. Bondarenko^{1,2}, bond.julia@mail.ru,
Azeez Ammar Emad¹, ammar.azeez548@gmail.com,
E.V. Vasilchikova², evasiltikova@vgasu.vrn.ru,
O.V. Bondarenko¹, oleg.bondarenko.2000@list.ru

¹ Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation,

² Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

Introduction. A characteristic feature of the development of modern economic systems is active association, integration of enterprises into larger economic entities. A distinctive feature of such associations is the multidirectional interests of its members. The development of innovative mechanisms for financial management of an integrated structure, allowing to take into account the conflicting interests of the enterprises of the association, is an urgent task. **Aim.** To develop mathematical models and algorithms to improve the efficiency of financial management of the association of business entities by forming an optimal package of projects and coordinated distribution of profits from its implementation between enterprises. **Materials and methods.** The proposed approach is based on the use of systems analysis methods, optimization methods, decision theory and game theory. The paper discusses the mechanism for the coordinated distribution of funds of the enterprises of the association in the implementation of projects, which consists of two enlarged stages. At the first stage, an optimal package of merger projects is formed. Each enterprise of the association offers its own variants of projects, from which a package of projects is formed. The constructed model of the formation of a package of projects that ensures the amalgamation of obtaining the greatest profit is a knapsack problem and is solved by the branch and bound method. At the second stage, the distribution of profits from the implementation of projects between the enterprises of the association is carried out. To find the distribution of profits, ensuring the coordination of the economic interests of the enterprises of the association, it is proposed to use the methods and principles of the theory of cooperative games. The paper shows that the described problem can be formally represented as a game in the form of a characteristic function. It is proposed to choose a certain element of the C-core as an agreed profit distribution. The formation of this element is carried out on the basis of an optimization model, the function of the goal and the system of restrictions of which takes into account quantitative indicators of the activity of enterprises' participation in the implementation of merger projects. **Results.** A mechanism has been developed for the coordinated distribution of financial resources of the enterprises of the association during the implementation of projects, based on mathematical models and methods. A feature of the mechanism is the application of the game principle when distributing the profit of projects. Practical calculations are carried out to substantiate the advantages of the presented approach in comparison with the known methods. **Conclusion.** The coordinated distribution of finances proposed in the work reasonably ensures the benefit of each enterprise from the joint implementation of projects and stimulates the management of enterprises to search for highly effective projects.

Keywords: association of business entities, project, reconciliation, financial distribution, mathematical model.

References

1. Zvyagintseva E.V. [Efficiency of the integrated structure of economic entities] *Bulletin of the Pacific State University of Economics*, 2007, no. 2 (42), pp. 3–12. (in Russ.)
2. Egorova A.V. [Integration of business entities as a synthesizing pattern]. *Bulletin of the Saratov State Social and Economic University*, 2018, no. 4 (73), pp. 28–32. (in Russ.)
3. Dolgikh E.N., Semenikhin A.V. [Formation of an Integrated Space and an Integrated Information Environment of Innovative Business Entities]. *Economic and Humanitarian Sciences*, 2019, no. 3 (326), pp. 97–108. (in Russ.)

4. Kuvshinov M.S., Bazhanov M.I. *Formirovanie mehanizma innovacionnogo razvitija promyshlennoj integrirovannoj struktury* [Formation of the Mechanism of Innovative Development of an Industrial Integrated Structure]. Chelyabinsk, SUSU Publishing Center, 2013. 168 p.
5. Bagautdinova N.G., Orlov I.Yu. [Realization of the Potential of Integrated Education in the System of Strategic Enterprise Management]. *Kazan Economic Bulletin*, 2015, no. 4 (18), pp. 27–37. (in Russ.)
6. Zakirova E.R., Rostovtsev K.V. [Integrated Business Entities: Management and Economic Security]. *Manager*, 2015, no. 6, pp. 18–24. (in Russ.)
7. Kuzin B.I., Yuriev V.N., Shakhdinarov G.M. *Metody i modeli upravlenija firmoj* [Methods and Models of Company Management]. St. Petersburg, Peter Publ., 2001. 432 p.
8. Novikov D.A. *Teorija upravlenija organizacionnymi sistemami* [Theory of Management of Organizational Systems]. Moscow, Publishing house of physical and mathematical literature, 2007. 584 p.
9. Burkov V., Shchepkin A., Irikov V., Kondratiev V. Methodology and Technology of Control System Development. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2019, vol. 181, pp. 29–38.
10. Barkalov S.A., Burkov V.N., Kurochka P.N. Designing Systems of Group Stimulation in the Management of Energy Complex Objects. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, vol. 983, pp. 55–68.
11. Barkalov S.A., Kurochka P.N., Pinaeva M.A. Model of Formation Plans for the Urban Areas Development. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Workshop “Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019”*. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations, 2019, p. 62035.
12. Tirole J. *The Theory of Corporate finance*. Princeton, Princeton University Press, 2006. 645 p.
13. Berlinger E., Lovas A., Juhasz P. State Subsidy and Moral Hazard in Corporate Financing. *CEJOR*, 2017, no. 25, pp. 743–770.
14. Bolton P., Devatrpont M. *Teorija kontraktov* [Theory of Contracts]. Moscow, Publishing house “Delo”, 2019. 800 p.
15. Kolokoltsov V.N., Malafeev O.A. *Matematicheskoe modelirovanie mnogoagentnyh sistem konkurencii i kooperacii* [Mathematical Modeling of Multi-agent Systems of Competition and Cooperation]. St. Petersburg, Publishing House “Lan”, 2012. 624 p.
16. Harshani J., Selten R. *Obshhaja teorija vybora ravnovesija v igrakh* [General Theory of the Choice of Equilibrium in Games]. St. Petersburg, School of Economics, 2001. 424 p.
17. Astanin S.V., Zhukovskaya N.K. [Conflict-Game Approach to the Distribution of Resources in the Organizational System]. *Applied Informatics*, 2011, no. 4 (34), pp. 125–132. (in Russ.)
18. Bondarenko Y.V., Goroshko I.V., Kashirina I.L. The Task of Coordinating Social and Economic Indicators of the Development of the Region and the Mathematical Approach to Its Solution. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1203, p. 012037.
19. Bondarenko Yu.V., Goroshko I.V. *Mehanizmy soglasovanija pokazatelej social'no-jekonomicheskogo razvitija regiona i rol' organov vnutrennih del v ih realizacii* [Mechanisms of Coordination of Indicators of Socio-economic Development of the Region and the Role of Internal Affairs in Their Implementation]. Moscow, Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2015. 128 p.

Received 25 August 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Модели и алгоритмы согласованного распределения финансов при реализации проектов объединения хозяйствующих субъектов / Ю.В. Бондаренко, Азиз Аммар Имад, Е.В. Васильчикова, О.В. Бондаренко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 83–94. DOI: 10.14529/ctcr200409

FOR CITATION

Bondarenko Yu.V., Azeez Ammar Emad, Vasilchikova E.V., Bondarenko O.V. Models and Algorithms of the Consistent Financial Distribution in the Implementation of Projects of the Association of Business Entities. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 83–94. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200409

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ КАК ФАКТОР ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ

О.В. Логиновский¹, Д.В. Гилёв²

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

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

Данная статья знакомит с основными математическими методами диагностики заболеваний. **Целью** исследования является применение комитетных методов для диагностики заболеваний для обеспечения эффективного управления медицинской организацией. **Методы исследования.** Для достижения поставленной цели использован усовершенствованный метод комитетов, использование которого позволяет эффективно решить задачу диагностики заболевания. С помощью статистического анализа были обработаны данные по классификации головных болей, на которых был апробирован метод комитетов. **Выводы исследования.** В работе вначале на основании изучения вопроса делается вывод, что диагностика является важнейшей задачей для осуществления эффективной деятельности любого медицинского учреждения. Далее, в теоретической части, формулируются основные модели диагностики, такие как дискриминантный анализ и таксономия (кластер-анализ). Затем для диагностирующей системы применяются методы дискриминантного анализа, позволяющие медицинскую задачу свести к системе линейных неравенств, используя прием разложения функции по базисным функциям. В конце статьи делаются важные выводы о том, что итерационные методы решения этой задачи группируются в основном вокруг метода линейной коррекции, а конечные методы – вокруг симплекс-метода. Также затрагивается вопрос использования коллективов решающих правил в пакетах прикладных программ. Далее в качестве практической части рассматривается применение описанных методов на конкретной медицинской задаче, а именно на диагностировании первичных головных болей по признакам. Для решения задачи строятся решающие правила, являющиеся следствием дискриминантного анализа. Для этих целей подключается метод комитетов, а в сравнении с ним применяются другие методы. Результаты показывают лучшую прогностическую силу у метода комитетов. В заключении делаются выводы про своеобразную специфику управления медицинскими организациями и выделяется критерий – правильная и своевременная диагностика – как один из основных, позволяющих говорить об эффективности управления с точки зрения охраны здоровья населения, что и является важным в комплексном подходе оценки эффективности медицинской организации. **Заключение.** Разработанный метод, связанный с диагностированием головных болей, смог обеспечить эффективную работу врачей и позволил снизить постановку неправильного диагноза в 2 раза, что соответственно повысило качество медицинской помощи.

Ключевые слова: медицинская диагностика, метод комитетов, эффективность управления, комплексный подход.

Введение

Для оценки качества оказания медицинской помощи или медицинской услуги целесообразно использовать комплексный метод, который наиболее приемлем для управления качеством медицинской помощи. В основу его положен системный анализ технологии процесса, взаимодействия подразделений медицинской организации и корреляционной зависимости показателей их работы с учетом вклада в общий результат. Здесь применимы инструменты, используемые для улучшения процессов производства, экспертный метод и самые прогрессивные – математические методы. Тем не менее первое, на что обращают внимание при комплексном подходе, это на корректность и своевременность поставленного диагноза. Именно от правильности диагноза зависит дальнейшее адекватное лечение, выздоровление человека и улучшение его качества жизни, и как следствие – повышение субъективной оценки качества организации лечения. Именно без полного

диапазонного диагноза невозможно вскрыть истинные причины заболевания и получить эффективное лечение. Поставленный диагноз по внешним проявлениям порой не объясняет причину заболеваний, что говорит об устаревших методах диагностики. Для достижения повышения процента правильной диагностики необходимо изучение и анализ существующих методов диагностики заболеваний и их оценка с позиции соответствия современному научно-техническому уровню. Увеличение числа правильно поставленных диагнозов приведет к повышению качества оказания медицинской помощи и медицинской услуги в целом. Несмотря на обилие существующих методов диагностики, всё ещё остаются неразрешимые проблемы в этой области. Врачам приходится сталкиваться с методами, при которых необходимо обработать большой объём разнородной информации (симптомов) и попытаться по ней классифицировать болезнь. Таким образом, важно найти точные методы описания, исследования, оценки и контроля процесса постановки диагноза. Наилучший путь к точности и логике рассуждений при решении любой задачи – это математический подход. В принципе этот подход можно выбирать независимо от того, насколько труден и сложен рассматриваемый вопрос. Если мы имеем дело с большим числом взаимозависимых факторов, обнаруживающих значительную естественную изменчивость, то для достаточно эффективного описания сложной схемы их влияния существует лишь один способ – использование соответствующего статистического метода. Если число факторов или число категорий данных очень велико, то желательно, или даже необходимо, использовать компьютер, чтобы искомые результаты можно было получить за достаточно короткое время. Такой подход ни в коей мере не умаляет значения интуиции и воображения.

1. Модели и диагностика

Исследование объектов или явлений начинается с построения некоторых исходных предположений и гипотез о его характеристиках. Выдвигаются предположения о том, какие свойства являются существенными, в каких пределах эти свойства варьируют, как их измерять. В результате экспериментов и экспертиз формируется материал наблюдений, на основании которого можно выдвинуть утверждения, называемые закономерностями. Закономерности нужны для систематизации и объяснения материала наблюдений, а также для прогнозирования новых фактов или результатов новых возможных экспериментов или экспертиз.

В нашем исследовании принципиальным является вопрос о моделировании неформального знания. Ключевыми понятиями в этом процессе являются диагностика и материал прецедентов.

Итак, любые два объекта могут быть моделями друг друга. Но лишь некоторые объекты мы выбираем в качестве подходящих моделей. Этот отбор ведется на базе выявления релевантных свойств, связывающих объекты между собой.

При построении математических моделей распознавания образов одним из основных исходных понятий является понятие класса (ранее классы часто называли «образами», но понятно, что термин «образ» в данном случае весьма неудачен, ведь речь идет не только о зрительных образах). Здесь под классом будем понимать просто некоторое множество объектов, сходных друг с другом в определенном отношении.

Модель объекта или ситуации – n -мерный вектор состояния

$$x = [x_1, \dots, x_n],$$

где x_i – значение i -го признака (i -го параметра, измеряемого на объекте).

Пространство состояний объектов – n -мерное векторное пространство, пространство R^n . В этом пространстве реальное множество состояний объектов нашей какой-либо конкретной задачи образует допустимое множество D . Далее допустимое множество предполагается разбитым на классы: $D = \cup D_i$. Объекты одного класса сходны друг с другом в некотором отношении, объекты разных классов различаются по этому отношению. При этом мы предполагаем, что мы знаем, что есть некоторые классы. Но как именно они построены, это нам неизвестно. И информация о классах, которой мы реально располагаем, – это примеры объектов из разных классов. Следовательно, мы знаем прецедентные подмножества классов: A_i – известное нам подмножество класса D_i . В задаче дискриминантного анализа требуется по этой информации составить представление о классах и дать их аналитическое описание. Например, у нас есть экземпляры техно-

логий, эффективность которых мы знаем из производственного опыта. Требуется дать прогноз эффективности для новых предполагаемых технологий, еще не прошедших достаточную проверку в реальном производстве.

Понятно, что задача дискриминантного анализа с несколькими классами сводится к последовательности задач, каждая из которых двухклассовая [1]. Поэтому нам достаточно пояснить, как решается задача построения моделей двух классов по их прецедентным множествам A и B . Эти множества являются частями множеств D_1 , D_2 , на которые разбито допустимое множество D в заданном пространстве R^n .

Последняя задача решается так. Строим функцию $f(x)$, где x пробегает допустимое множество D . Эта функция определяет поверхность, определяемую уравнением $f(x) = 0$, причем указанная поверхность разделяет множества A и B . Это значит, что $f(x) > 0 \forall x \in A$ и $f(x) < 0 \forall x \in B$. Если эта задача решена и функция $\tilde{f}(x)$ является ее решением, то мы получаем правило диагностики (оно же – правило классификации) любого нового объекта, вектор состояния которого – это, например, вектор $y = [y_1, \dots, y_n]$. А именно, мы полагаем: $y \in D_1$, если $\tilde{f}(y) > 0$, и $y \in D_2$, если $\tilde{f}(y) < 0$. Если же $\tilde{f}(y) = 0$, то y принадлежит границе между этими классами.

Следующая модель распознавания образов – это задача таксономии (задача автоматической классификации, задача распознавания «без учителя»). В этой задаче дано (как правило, конечное) множество M n -мерных векторов. Требуется разбить множество M на непересекающиеся подмножества (таксоны), причем объекты, входящие в один таксон, должны быть достаточно близкими друг к другу с точки зрения заранее выбранного критерия близости, а элементы из разных таксонов достаточно далекими друг от друга по этому же критерию. В экономике – эта задача классификации, их масса.

Следующая область задач распознавания образов – это задачи выбора признаков, их преобразования, это задачи оценки признаков и систем признаков. Это называется общими словами: решить задачу об информативности признаков [2].

Итак, математические модели и методы в прикладных областях должны существенно использовать диагностику, так как основанные на них системы должны работать в условиях существенной априорной неопределенности знаний о свойствах внешней среды. Это делает затруднительным конструирование их только на основе априорных данных. Таким образом, необходимо создание систем, способных в режиме функционирования изменять на базе обработки доступной текущей информации свои параметры или свою структуру с тем, чтобы с течением времени обеспечить выполнение целевых установок и задач. Такие системы называются обучаемыми или адаптивными. В их основе – классификация состояний.

Под системой подразумевается устройство или модель, осуществляющие отображение (как правило, однозначное) множества входных стимулов или сигналов во множество выходных сигналов. Входные сигналы можно называть изображениями, выходные – откликами системы. Распознающая (диагностирующая) система или классификатор – это система, способная к классификации множества изображений в соответствии с некоторой априорной классификацией [3].

2. Математические методы обучения диагностики

Выше мы предельно кратко перечислили некоторые идеи методов распознавания. Сейчас наступил момент для сжатого изложения ключевых моментов.

Вначале рассмотрим методы решения задачи дискриминантного анализа, то есть следующей задачи: найти разделяющую функцию f из функционального класса F такую, что

$$f(x) > 0 \forall x \in A, f(x) < 0 \forall x \in B.$$

Подавляющая группа методов решения этой задачи основана на ее сведении к линейным неравенствам, а для нахождения решения системы линейных неравенств применяются итерационные методы [4].

Чтобы свести задачу дискриминантного анализа к линейным неравенствам, пользуются приемом разложения функции $f(x)$ по базисным функциям. Тогда задача дискриминантного

анализа сводится к поиску коэффициентов разложения, а относительно этих коэффициентов получаем систему линейных неравенств [5].

При этом итерационные методы решения этой задачи группируются в основном вокруг метода линейной коррекции, а конечные методы – вокруг симплекс-метода [6]. Многие пакеты прикладных программ используют более общие конструкции для линейных неравенств [7]. Эти конструкции позволяют находить коллективы решающих правил. При этом доказано, что коллективы более эффективны, чем единичные правила. Более того, коллективы правил приводят к нейронным сетям. Наиболее глубоко разработанная теория в этом направлении – это теория комитетов и комитетных конструкций [8]. В рамках этой теории получены точно обоснованные правила коллективных решений диагностики и прогнозирования состояний объектов. Отметим, что парадокс Эрроу, относящийся к коллективным методам упорядочения объектов, не наблюдается в случае диагностики.

3. Коллективные методы диагностики

Разделяющий комитет – это модель консилиума. С его помощью можно, используя только линейные или аффинные функции, когда принимают в рассмотрение веса признаков, составлять корректные коллективные решающие правила диагностики и классификации.

Метод комитетов – это полностью современный инструментарий информатики, позволяющий решать самые трудные задачи [9].

С более общей точки зрения метод комитетов – это аппарат анализа противоречивых моделей, способ корректной развязки противоречий с указанием смысла этой развязки.

Если сравнить комитет с методом ближайшего соседа, в котором также дается нелинейная (в частном случае кусочно-линейная) функция принятия решений, то исследованиями показано фундаментальное положительное отличие метода комитетов: у него более широкие возможности и более глубокое математическое обоснование – он более вычислительно эффективен, пригоден для более широкого круга задач выбора, в том числе для задач выбора и сравнения вариантов практических решений. Метод комитетов – это целая теория, раздел современной математики [10].

Но спрашивается, в чем все-таки можно усмотреть эффективность метода комитетов?

Она доказана практической и теоретической апробацией, успешным решением массы практических задач. На комитетных конструкциях основан пакет КВАЗАР, один из немногих получивших широкое признание и широкое внедрение в РФ, он имеет и коммерческую реализацию [11].

Какова связь метода комитетов с методами кусочно-линейных решающих функций? Или кусочно-непрерывных?

Метод комитетов дает кусочно-линейные и кусочно-непрерывные решающие правила. И всякая задача, разрешимая в классе линейных или аффинных функций, разрешима и методом комитетов.

Исключительно важно то, что метод комитетов имеет нейросетевой вариант и позволяет построить многослойную нейронную сеть для диагностики и прогнозирования.

Оценки сложности математически выведены: они отвечают в точности сложности самой решаемой задачи. Например, если в задаче дифференциальной диагностики классы очень сложно различаются, то эта сложность будет и в разделяющем комитете. В минимальном разделяющем комитете не нужно использовать память большую, чем в материале прецедентов, на котором обучаются диагностике.

В методе комитетов оценивается и важность признаков. Например, симптомов и синдромов. Они определяются величинами коэффициентов при переменных в коллективе разделяющих функций.

Также стоит отметить, что метод комитетов строит слоистую нейронную сеть. Это один из наиболее важных и эффективных классов нейронных сетей. Если огрублять, то другой класс – с обратным распространением ошибки – это не что иное, как применение давно известного метода наименьших квадратов, но есть и другие классы нейронных сетей.

4. Пример решения задачи диагностики заболеваний на базе описанных методов

Нами была решена задача, поставленная неврологами. Необходимо построить решающее правило, позволяющее верно диагностировать первичную головную боль, а именно головную боль напряжения и мигрень. Согласно проведенным исследованиям коллег-медиков [12], в 80 %

случаев диагностики по головным болям были поставлены неверно, так что задача является актуальной и важной, так как методы лечения этих видов головных болей совершенно разные. Медики собрали данные, а именно провели полуструктурированное интервью с заполнением анкеты у трёх социальных групп: доноры крови, рабочие СургутНефтеГаза, студенты УГМУ и УрФУ.

Анкета включала характеристики головных болей, возраст, в котором начались головные боли, частоту болей за последний год и частоту в месяц, их лечение, использование анальгетиков и триптанов для купирования болей, а также предшествующую диагностику. Затем нами были сформированы три базы данных про Ms Excel для последующей математической обработки.

Для построения решающего правила использовали выборку доноров крови как считающихся относительно здоровыми (без хронических заболеваний). Выборка была упорядочена по алфавиту для того, чтобы был «случайный» порядок векторов. Было выбрано 56 векторов с фактором «мигрень» и 147 – с «головная боль напряжения».

Приведём список используемых признаков в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

№	Признак	№	Признак
1	Диагноз (1 – мигрень, 2 – ГБН)	18	Пульсирующие
2	Односторонние	19	Слабые
3	Двусторонние	20	Умеренные
4	В лобной области	21	Сильные
5	В височной	22	Разные
6	В теменной	23	Усиление при обычной физической нагрузке
7	В затылочной	24	Продолжительность ГБ < 1/2 часа
8	В половине головы слева	25	Продолжительность ГБ 1/2–4 часа
9	В половине головы справа	26	Продолжительность ГБ 5–23 часа
10	Давящие	27	Продолжительность ГБ 1–3 дня
11	В виде «обруча»	28	Продолжительность ГБ 4–7 дней
12	Колющие	29	Продолжительность ГБ > 7 дней
13	Монотонные	30	Тошнота
14	Ноющие	31	Рвота
15	Тупые	32	Фотофобия
16	Распирающие	33	Фонофобия
17	Ломящие	34	Головокружение

Первый признак – классообразующий, в процессе построения решающих правил не используется.

Затем была проведена обработка в пакете КВАЗАР, а также при использовании R-studio. Была проведена нормировка значений признаков, оценка информативности признаков и задание размерности пространства, построение решающего правила одним из алгоритмов:

- рекуррентный алгоритм линейного разделения 2 множеств (Б.Н. Козинец);
- метод потенциальных функций (А.Г. Аркадьев, Э.М. Браверман);
- построение комитета старшинства (W.L. Osborne, Н.Г. Белецкий);
- метод случайного леса;
- метод опорных векторов (SVM).

Оптимальным получилось использование 8 наиболее информативных признаков. В методе опорных векторов использовалось гауссовское ядро.

Для оценки информативности признаков использовались два алгоритма:

Пусть имеется k обучающих подвыборок векторов: $X_1, \dots, X_k \in R^n$ соответственно числу рассматриваемых классов. В соответствии с первым алгоритмом («по разности средних значений») для каждого признака вычисляются его средние значения в этих множествах, обозначаемые через $a_1^{(i)}, \dots, a_k^{(i)}$. Информативность i -го признака рассчитывается по следующей формуле

$$J_i = \frac{2}{k(k-1)} \sum_{l=1}^{k-1} \sum_{m=l+1}^k |a_l^{(i)} - a_m^{(i)}|.$$

При использовании второго алгоритма («по частотам») область изменения значений каждого признака разбивается на z интервалов, после чего рассчитываются относительные частоты попадания значений рассматриваемого признака из векторов разных классов в каждый из этих интервалов. Информативность i -го признака рассчитывается по формуле

$$J_i = \frac{2}{k(k-1)} \sum_{t=1}^z \sum_{l=1}^{k-1} \sum_{m=l+1}^k |p_{l,t}^{(i)} - p_{m,t}^{(i)}|,$$

где $p_{l,t}^{(i)}$, $p_{m,t}^{(i)}$ – частоты попаданий значений i -го признака из векторов l -го и m -го классов в t -й интервал. Значение числа интервалов разбиения z зависит от объема выборок и рассчитывается в пакете КВАЗАР по известной формуле $1 + 1,39 \ln m$, где m – численность наименьшей подвыборки.

Полученные значения нормируются:

$$\forall i \in \overline{1, n}: J_i^H = \frac{J_i - \min_{j \in \overline{1, n}} J_j}{\max_{j \in \overline{1, n}} J_j - \min_{j \in \overline{1, n}} J_j}$$

и образуют относительные значения информативности. При этом наиболее информативный признак получает значение 1, а наименее информативный – 0. В результате все признаки оказываются упорядоченными по убыванию информативности в диапазоне от 1 до 0. Первые n' признаков используют в качестве искомой подсистемы.

Для каждого метода была реализована перекрёстная проверка. Для этого элементы двух классов делились на 7 групп, 6 из которых использовались в качестве обучающей выборки, а одна в качестве тестовой. Процедура повторялась 7 раз; в итоге каждая из 6 групп данных использовалась для тестирования. Основные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

№ п/п	Метод обучения	Число признаков	Средний процент распознавания на экзамене
1	Метод потенциальных функций	8	94,7
2	Метод комитетов старшинства	8	98,8
3	Рекуррентный алгоритм линейного разделения	8	94,6
4	Метод случайного леса	8	95,6
5	Метод опорных векторов	8	84,6
6	Метод случайного леса	32	93,3
7	Метод опорных векторов	32	75,3

Построенные решающие правила являются «компьютероориентированными». Классификацию с их помощью можно проводить в пакете КВАЗАР или же на их основе можно написать специальную распознающую программу с необходимым интерфейсом для врачей.

5. Повышение эффективности управления медицинской организацией за счет совершенствования процесса диагностики

Управление медицинскими организациями имеет своеобразную специфику, так как здравоохранение – особая сфера деятельности, которая существенно отличается от других. Здесь во главе угла встает именно охрана здоровья населения. В связи с этим эффективность управления рассматривается не столько с точки зрения экономики, а сколько со стороны повышения качества и доступности медицинской помощи.

Некоторые авторы [13] придерживаются мнения, что для оценки качества оказания медицинской помощи или медицинской услуги целесообразно использовать комплексный метод, который наиболее приемлем для управления качеством медицинской помощи. В основу его положен системный анализ технологии процесса, взаимодействия подразделений медицинской организации и корреляционной зависимости показателей их работы с учетом вклада в общий результат. Здесь применимы инструменты, используемые для улучшения процессов производства, экспертный

метод и самые прогрессивные – математические методы. Тем не менее первое, на что обращают внимание при комплексном подходе [14, 15], это на корректность и своевременность поставленного диагноза. Именно от правильности диагноза зависит дальнейшее адекватное лечение, выздоровление человека и улучшение его качества жизни, и как следствие – повышение субъективной оценки качества организации лечения. Именно без полного диапазонного диагноза невозможно вскрыть истинные причины заболевания и получить эффективное лечение. Поставленный диагноз по внешним проявлениям порой далеко не объясняет причину заболеваний, что говорит об устаревших методах диагностики. Для достижения повышения процента правильной диагностики необходимо изучение и анализ существующих методов диагностики заболеваний и их оценка с позиции соответствия современному научно-техническому уровню. Увеличение числа правильно поставленных диагнозов приведет к повышению качества оказания медицинской помощи и медицинской услуги в целом [16]. Это же подтверждается и нашим исследованием. А именно: наши разработки, связанные с диагностированием головных болей, смогли обеспечить эффективную работу врачей-неврологов в медицинском центре лечения головных болей г. Екатеринбурга и позволило снизить постановку неправильного диагноза в 2 раза, что соответственно повысило качество медицинской помощи.

Литература

1. Мазуров, Вл.Д. Методы математического программирования и распознавания образов в планировании производства / Вл.Д. Мазуров // Математические методы в планировании промышленного производства: сб. тр. ИММ УНЦ АН СССР. – Свердловск, 1977. – № 22. – С. 3–27.
2. Тихонов, А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1979. – 288 с.
3. Журавлев, Ю.И. Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания или классификации / Ю.И. Журавлев // Проблемы кибернетики: сб. – М.: Наука, 1978. – Вып. 33.
4. Черников, С.Н. Свертывание конечных систем линейных неравенств / С.Н. Черников // Докл. АН СССР. – 1963. – Т. 152, № 5. – С. 1075–1078.
5. Еремин, И.И. Итеративный метод для чебышевских приближений несовместных систем линейных неравенств / И.И. Еремин // Докл. АН СССР. – 1962. – Т. 143, № 6. – С. 1253–1256.
6. Линейные неравенства и смежные вопросы / под. ред. Г.У. Кун, А.У. Таккер – М.: Изд-во иностранной литературы, 1959. – 470 с.
7. Черников, С. Н. Линейные неравенства / С.Н. Черников. – М.: Наука, 1968. – 488 с.
8. Мазуров, Вл.Д. Метод комитетов в задачах оптимизации и классификации / Вл.Д. Мазуров. – М.: Наука, 1990. – 248 с.
9. Мазуров, Вл.Д. Метод комитетов в распознавании образов / Вл.Д. Мазуров // Тр. ИММ УНЦ АН СССР. – Свердловск, 1974. – № 6. – 166 с.
10. Mazurov, V.I.D. Method of committees and applications in operations research / V.I.D. Mazurov // Math. Operationsforsch. Statist., Ser. Optimization. – DDR, 1979. – Vol. 10, no. 3. – P. 365–371.
11. Казанцев, В.С. Пакет «КВАЗАР» прикладных программ распознавания образов / В.С. Казанцев // Планирование горно-металлургического производства (программы оптимизации): тр. ИММ УНЦ АН СССР. – Свердловск, 1977. – № 7.
12. Headache-attributed burden and its impact on productivity and quality of life in Russia: structured healthcare for headache is urgently needed / I. Ayzenberg, Z. Katsarava, A. Sborowski et al. // European Journal of Neurology. – 2014. – Vol. 21. – P. 758–765.
13. Линденратен, А.Л. Контроль качества организации медицинской помощи: современные подходы / А.Л. Линденратен, В.В. Ковалева // Здоровоохранение. – 2011. – № 6. – С. 50–55.
14. Линденратен, А.Л. Качество организации медицинской помощи и критерии для его оценки / А.Л. Линденратен // Бюллетень НИИ общественного здоровья. – 2013. – Вып. 2. – С. 20–23.
15. Галустова, К.Ю. Совершенствование системы управления медицинской организацией / К.Ю. Галустова // Политика, экономика и инновации. – 2018. – № 3 (20). – С. 1–3.
16. Антипова, Н. Совершенствование управления здравоохранением / Н. Антипова. – М., 2015 – 38 с.

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; loginovskiiiov@susu.ru.

Гилёв Денис Викторович, старший преподаватель кафедры экономики Института экономики и управления, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; deni-gilev@narod.ru.

Поступила в редакцию 2 сентября 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr200410

THE USE OF MATHEMATICAL METHODS OF DIAGNOSTICS AS A FACTOR OF EFFECTIVE MANAGEMENT OF A MEDICAL ORGANIZATION

O.V. Loginovskiy¹, loginovskiiiov@susu.ru,

D.V. Gilev², deni-gilev@narod.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

Introduction. This article introduces the main mathematical methods of diagnosis of diseases. At first, based on the study of the issue, it is concluded that the task of diagnostics is the most important task for the implementation of effective activities of any medical institution. **Methods.** Further, in the theoretical part, the main diagnostic models are formulated, such as discriminant analysis and taxonomy (cluster analysis). Then methods of discriminant analysis are applied for the diagnostic system, which allow reducing the medical problem to a system of linear inequalities, using the method of decomposition of the function by basic functions. **Results.** At the end of the article, important conclusions are made that iterative methods for solving this problem are grouped mainly around the linear correction method, and final methods are grouped around the simplex method. The issue of using decision rule collectives in application packages is also discussed. Further, as a practical part, we consider the application of the described methods to a specific medical task, namely, the diagnosis of primary headaches by signs. To solve the problem, we construct the decisive rules that are the result of discriminant analysis. For these purposes, the Committee method is enabled, and other methods are used in comparison with it. The results show better predictive power for the Committee method. **Conclusion.** In the conclusion the author about kind of the specifics of management of medical institutions, and highlighted the criterion of a correct and timely diagnosis – as one of the main, lets talk about the efficiency of management from the point of view of public health that is Central to an integrated approach of evaluating the effectiveness of medical organizations.

Keywords: medical diagnostics, method of control, management efficiency, integrated approach.

References

1. Mazurov V.I. D. [Methods of Mathematical Programming and Image Recognition in Production Planning]. *Mathematical Methods in Industrial Production Planning. Collection of works of IMM UNC of the USSR Academy of Sciences*, 1977, no. 22, pp. 3–27. (in Russ.)
2. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for Solving Incorrect Problems]. Moscow, Science, 1979. 288 p.
3. Zhuravlev Yu.I. *Ob algebraicheskom podkhode k resheniyu zadach raspoznavaniya ili klassifikatsii* [On the Algebraic Approach to Solving Recognition or Classification Problems]. *Collection of Problems of Cybernetics*. Moscow, Science Publ., 1978, iss. 33.

4. Chernikov S.N. [Convolution of Finite Systems of Linear Inequalities]. *Collection of Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1963, vol. 152, no. 5, pp. 1075–1078. (in Russ.)
5. Eremin I.I. [Iterative Method for Chebyshev Approximations of Incompatible Systems of Linear Inequalities]. *Collection of Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1962, vol. 143, no. 6, pp. 1253–1256. (in Russ.)
6. Kuhn H.W., Tucker A.W. *Lineynyye neravenstva i smezhnyye voprosy* [Linear Inequalities and Related Issues]. Moscow, IL Publ., 1959. 470 p.
7. Chernikov S.N. *Lineynyye neravenstva* [Linear Inequalities]. Moscow, Science Publ., 1968. 488 p.
8. Mazurov V.I.D. *Metod komitetov v zadachakh optimizatsii i klassifikatsii* [Method of Committees in Optimization and Classification Problems]. Moscow, Science Publ., 1990. 248 p.
9. Mazurov V.I.D. [Method of Committees in Image Recognition]. *IMM UNC of the USSR Academy of Sciences*, 1974, no. 6, 166 p. (in Russ.)
10. Mazurov V.I.D. Method of Committees and applications in operations research. *Math. Operationsforsch. Statist., Ser. Optimization*, DDR, 1979, vol. 10, no. 3, pp. 365–371.
11. Kazantsev V.S. [Package “QUASAR” of Applied Image Recognition Programs]. *Planning of Mining and Metallurgical Production (Optimization Programs)*. *Collection of Works of IMM UNC of the USSR Academy of Sciences*. Sverdlovsk, 1977, no. 7. (in Russ.)
12. Ayzenberg I., Katsarava Z., Sborowski A. Headache-Attributed Burden and Its Impact on Productivity and Quality of Life in Russia: Structured Healthcare for Headache is Urgently Needed. *European Journal of Neurology*, 2014, vol. 21, pp. 758–765.
13. Lindenbraten A.L., Kovaleva V.V. [Quality Control of the Organization of Medical Care: Modern Approaches]. *Health Care*, 2011, no. 6, pp. 50–55. (in Russ.)
14. Lindenbraten A.L. [Quality of Medical Care Organization and Criteria For its Evaluation]. *Bulletin of the Research Institute of Public Health*, 2013, iss. 2, pp. 20–23. (in Russ.)
15. Galustova K.Yu. [Improving the Management System of a Medical Organization]. *Politics, Economics, and Innovation*, 2018, no. 3 (20), pp. 1–3. (in Russ.)
16. Antipova N. *Sovershenstvovaniye upravleniya zdravookhraneniym* [Improving Healthcare Management]. Moscow, 2015. 38 p.

Received 2 September 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Логиновский, О.В. Использование математических методов диагностики как фактор эффективного управления медицинской организацией / О.В. Логиновский, Д.В. Гилёв // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 95–103. DOI: 10.14529/ctcr200410

FOR CITATION

Loginovskiy O.V., Gilev D.V. The Use of Mathematical Methods of Diagnostics as a Factor of Effective Management of a Medical Organization. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 95–103. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200410

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

УДК 681.5

DOI: 10.14529/ctcr200411

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ФЛЕГМОВОГО ЧИСЛА РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ

Л.Г. Тугашова¹, А.В. Затонский²

¹ Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, Россия,

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники, Пермский край, Россия

Введение. В статье приведен обзор способов управления установками первичной переработки нефти. Для улучшения эффективности разделения предложено стабилизировать флегмовые числа в ректификационной колонне. **Цель работы.** Разработать систему автоматического регулирования флегмового числа секции дизельного топлива атмосферной колонны нефтеперерабатывающей установки. Исследовать режимы работы атмосферной колонны с участием полученной системы автоматического регулирования. **Материалы и методы.** Рассмотрены особенности процесса ректификации нефти атмосферного блока нефтеперерабатывающей установки малой мощности. Отмечены особенности отвода тепла с промежуточным циркуляционным орошением по сравнению с крупнотоннажной установкой. Выполнен выбор параметров объекта с разделением на группы. Для достижения поставленной в работе цели составлена динамическая модель секции кожухотрубных теплообменных аппаратов для нагрева нефти дизельным топливом на нефтеперерабатывающей установке малой мощности в виде системы дифференциальных уравнений теплового баланса. Для нахождения расхода обессоленной нефти и расхода соленой воды составлено уравнение материального баланса электродегидрататора. Получена зависимость флегмового числа секции дизельного топлива атмосферной колонны от температур на входе и выходе циркуляционного орошения атмосферной колонны, расходов острого орошения, циркуляционного орошения и отбора нефтяных фракций. Результирующая модель состоит из двух частей: линейной части секции электродегидрататора и теплообменников, определяющей температуры теплоносителей, и нелинейной выходной части, определяющей флегмовое число в зависимости от технологических параметров. Предлагаемая модель позволяет исследовать влияние возмущающих воздействий на управляемые параметры. Инструментом реализации полученной модели выбран программный продукт *MATLAB/Simulink*. С участием разработанной модели объекта исследования построена система автоматического регулирования флегмового числа в *MATLAB/Simulink*. **Заключение.** Получены результаты моделирования системы автоматического регулирования флегмового числа секции дизельного топлива атмосферной колонны нефтеперерабатывающей установки малой мощности с учетом особенностей процесса в условиях воздействия возмущений.

Ключевые слова: ректификация, управление по модели, теплообменный аппарат, циркуляционное орошение, флегмовое число, динамическая модель, параметр.

Введение

В настоящее время на нефтеперерабатывающих установках, являющихся сложными многомерными объектами, актуальной задачей является управление в условиях воздействия различных возмущений при выполнении требований к качеству получаемых нефтепродуктов. При управлении объектами нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) (ректификационными колоннами, теплообменными аппаратами, печами и др.) наряду с типовым решением, предполагающим одноконтурные и каскадные системы автоматического управления (САУ), применяется управление с использованием математических моделей.

Например, в статье [1] приведено описание применения в управлении ректификационной колонной эталонной модели. В работе [2] рассмотрена система усовершенствованного управления компании *Yokogawa*, предназначенная для управления крупным НПЗ на основе прогнозирующих моделей. В работе [3] предложен метод управления по модели малым НПЗ в условиях переменного расхода и состава сырья. Для достижения цели управления предлагается принцип управления атмосферной установкой ректификации нефти, сочетающий сведение задачи управления отбором нефтепродуктов заданного фракционного состава к управлению температурным режимом установки и стабилизацию промежуточных параметров.

Применяются также регуляторы с внутренней *Internal model control (IMC)*-моделью. Регулятор представляет собой инвертированную модель объекта управления, которую не всегда возможно получить. Например, в работе [4] применяется *IMC*-модель управления температурой нагреваемой жидкости в кожухотрубном теплообменнике. В статье [5] предложено применение каскадной САУ теплоэнергетическими объектами на базе регуляторов с *IMC*-моделью для компенсации возмущений. В методе *Skogestad IMC (SIMC)* [6] задается желаемый вид переходной характеристики замкнутой САУ, описываемый инерционным звеном первого порядка. Параметром настройки *SIMC*-метода является ожидаемая постоянная времени этого звена. Модель объекта аппроксимируется динамическим звеном первого или второго порядка с запаздыванием.

Математическая модель процесса циклической бинарной ректификации с учетом транспортного запаздывания приведена в [7]. В работе [8] получены модели показателей качества нефтепродуктов с учетом транспортного запаздывания с применением *EM*-метода.

В статье [9] предложена адаптивная система регулирования температуры углеводородного конденсата на выходе из кожухотрубного теплообменника, состоящая из ПИ-регулятора и последовательного псевдолинейного корректирующего устройства динамических свойств систем САУ.

В статье [10] рассмотрена возможность применения компенсаторов возмущений по расходу и составу сырья при управлении ректификационной колонной. При применении компенсаторов затруднительна практическая реализация и возмущений в системе может быть довольно много.

Для улучшения эффективности разделения в атмосферной колонне (АК) маломощной нефтеперерабатывающей установки предлагается поддержание на заданном значении флегмового числа (ФЧ) в секциях колонны. Целью работы является разработка динамической модели теплообменных аппаратов в схеме циркуляционного орошения (ЦО) АК. Для определения ФЧ необходимо дополнить модель теплообменников выражением, определяющим ФЧ в зависимости от температур на входе и выходе (возврате) ЦО дизельного топлива, расхода ЦО, отборов дизельного топлива и бензиновой фракции и других параметров процесса. Затем необходимо провести исследование модели системы автоматического регулирования ФЧ в условиях воздействия возмущений.

Определена следующая последовательность решения задачи: выявление особенностей процесса ректификации нефти на исследуемой установке; выбор входных и выходных параметров объекта управления (ОУ) и определение взаимосвязи между ними; разработка динамической математической модели секции теплообменников с учетом возмущения по расходу сырой нефти, поступающей на установку; получение математического выражения для определения ФЧ в секции отбора дизельного топлива; реализация полученной модели ОУ и САУ в программе *MATLAB/Simulink*; определение настроечных параметров регулятора.

1. Особенности процесса ректификации нефти на исследуемой установке

Описание технологического процесса. Приведем краткое описание технологического процесса атмосферного блока маломощной нефтеперерабатывающей установки (до 500 тыс. т). После блока стабилизации отбензиненная нефть поступает на четвертую тарелку АК. С тринадцатой тарелки АК отбирается дизельная фракция. Между седьмой и восьмой тарелками расположена накопительная тарелка, с которой производится отбор атмосферного газойля. В колонну подается перегретый водяной пар.

Пары бензина, отводимые с верха колонны, конденсируются в аппарате воздушного охлаждения и поступают в рефлюксную емкость. Для поддержания температуры верха колонны в пределах 125–140 °С прямогонный бензин подается на орошение. Фракция дизельного топлива отбирается с тринадцатой тарелки колонны с температурой 210–240 °С, часть которой подается в отпарную колонну для дополнительной отгонки легких фракций и стабилизации. Другая часть

охлаждается сырой и обессоленной нефтью в теплообменниках и в качестве внутреннего циркуляционного орошения возвращается на шестнадцатую тарелку АК. Высококипящие нефтяные остатки стекают по тарелкам отгонной части в куб колонны. Мазут из куба колонны с температурой 300–340 °С насосами подается в печь, затем в вакуумную колонну [11, 12].

Особенности технологического процесса малотоннажной установки. Как видим, особенностью вышеописанной нефтеперерабатывающей установки малой мощности является организация потоков циркуляционного орошения и отбора нефтепродуктов. Стандартные схемы отвода тепла с промежуточным циркуляционным орошением (как в крупнотоннажных установках [13]) не применяются. На маломощной установке сырая нефть подается на блок теплообменников (рис. 1), где проходит по трубному пространству теплообменника Т-2, там подогревается дизельным топливом (циркуляционным орошением АК).

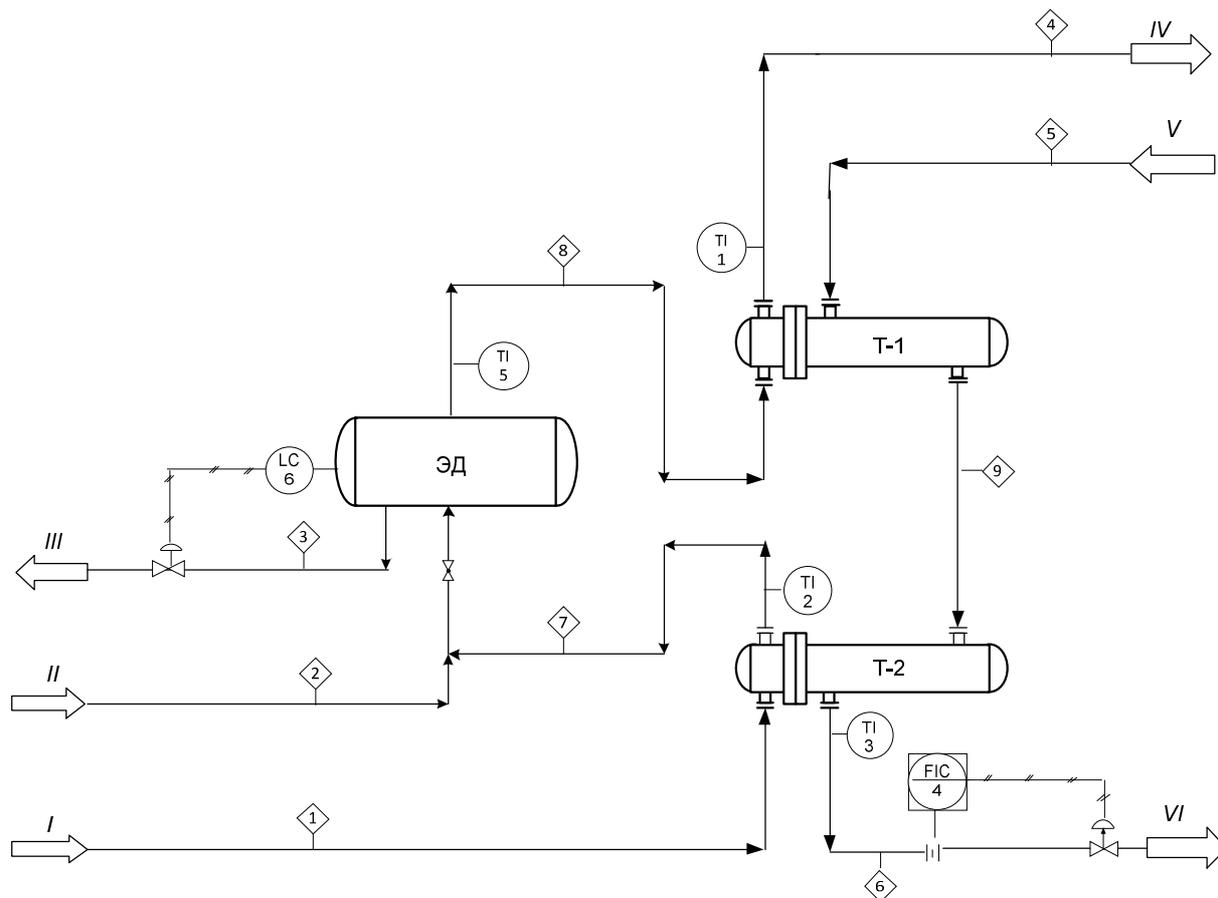


Рис. 1. Схема автоматизации секции теплообменных аппаратов циркуляционного орошения:
 Т-1 – теплообменник 1; Т-2 – теплообменник 2; ЭД – электродегидратор; I – сырая нефть в теплообменник Т-2; II – вода в ЭД; III – соленая вода из ЭД; IV – обессоленная нефть на стабилизацию; V – дизельное топливо из АК; VI – дизельное топливо в АК; TI1, TI2, TI3, TI5 – датчики температуры; FIC4 – регулятор расхода циркуляционного орошения дизельного топлива; LC6 – регулятор межфазного уровня; 1 – параметры потока сырой нефти на входе Т-2; 2 – параметры потока промывочной воды на входе ЭД; 3 – параметры потока соленой воды на выходе ЭД; 4 – параметры потока нефти на выходе Т-1; 5 – параметры потока дизельного топлива из АК в Т-1; 6 – параметры потока дизельного топлива в АК из Т-2 (возврат ЦО); 7 – параметры потока сырой нефти из Т-2 в ЭД; 8 – параметры потока обессоленной нефти из ЭД в Т-1; 9 – параметры потока дизельного топлива из Т-1 в Т-2 (значения параметров 1–9 приведены в таблице)

Fig. 1. Scheme of automation of the section of heat exchangers for circulation flash:
 T-1 – heat exchanger 1; T-2 – heat exchanger 2; EDM – electric dehydrator; I – crude oil in the heat exchanger T-2; II – water in EDM; III – salt water from EDM; IV – desalted crude oil for stabilization; V – diesel oil from AT; VI – diesel oil from AT; TI1, TI2, TI3, TI5 – temperature sensors; FIC4 – diesel oil circulation flash flow regulator; LC6 – interphase level regulator; 1 – stream variables of crude oil at T-2 inlet; 2 – stream variables of drilling water at EDM inlet; 3 – stream variables of salty water at EDM outlet; 4 – stream variables of oil at T-1 outlet; 5 – stream variables of diesel oil from AT to T-1; 6 – stream variables of diesel oil in AT from T-2 (returning of circulating reflux); 7 – crude oil stream variables from T-2 to electrical dehydrator; 8 – desalted oil stream variables from electrical dehydrator to T-1; 9 – diesel oil stream variables from T-1 to T-2 (stream variables 1–9 are given in the table)

После теплообменника Т-2 сырая нефть с температурой 100–120 °С поступает в электродегидратор (ЭД), в котором предусмотрены линии со смесительными устройствами для ввода водонефтяной смеси. Для снижения концентрации растворенных солей и предотвращения их отложения в теплообменниках из емкости в линию сырой нефти перед ЭД подается промывочная вода в количестве 4 % от расхода сырой нефти. Обезвоженная и обессоленная нефть выводится с верха ЭД и проходит через трубное пространство теплообменника Т-1, где подогревается дизельным топливом.

2. Разработка математической модели секции теплообменников циркуляционного орошения и электродегидратора

Выбор параметров объекта управления. Исходя из вышеприведенного описания технологического процесса, разделим параметры, относящиеся к блоку теплообменников Т-1 и Т-2, на группы параметров. Обозначения параметров приведены в соответствии с номерами потоков на рис. 1.

Все параметры ОУ можно разделить на следующие взаимосвязанные группы:

1. Входные параметры: F_1 – расход сырой нефти; F_5 – расход циркуляционного орошения (дизельного топлива).

2. Промежуточные параметры: T_4 – температура сырой нефти на выходе Т-1; T_6 – температура дизельного топлива в АК из Т-2 (возврат ЦО); T_7 – температура сырой нефти из Т-2 в ЭД; T_8 – температура обессоленной нефти из ЭД в Т-1; T_9 – температура дизельного топлива из Т-1 в Т-2; $T_{st.2}$ – температура стенки трубок Т-2; $T_{st.1}$ – температура стенки трубок Т-1.

3. Выходной параметр: R – флегмовое число секции отбора дизельного топлива.

Для удобства при составлении математической модели входные параметры объединим в вектор \mathbf{u} , промежуточные – в вектор \mathbf{x} , \mathbf{y} – выходной параметр:

$$\{F_1, F_5\} \in \mathbf{u};$$

$$\{T_4, T_6, T_7, T_8, T_9, T_{st.2}, T_{st.1}\} \in \mathbf{x};$$

$$\{R\} \in \mathbf{y}.$$

Получение системы уравнений динамической математической модели секции теплообменников. На атмосферном блоке рассматриваемой нефтеперерабатывающей установки применяются противоточные кожухотрубные теплообменники. Составим математическую модель секции теплообменников с учетом взаимосвязей выбранных параметров.

Рассмотрим секцию теплообменников системы циркуляционного орошения атмосферной колонны как объект с сосредоточенными параметрами. Динамическую модель секции кожухотрубных теплообменников для нагрева нефти циркуляционным потоком дизельного топлива определим в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) теплового баланса:

$$\begin{aligned} \rho_6 V_6 c_6 \frac{d(\Delta T_6)}{dt} &= -\alpha_{t2} S (\Delta T_6 - \Delta T_{st.2}) - c_6 F_{6,0} \Delta T_6 + c_9 F_{9,0} \Delta T_9; \\ \rho_{st} V_{st} c_{st} \frac{d(\Delta T_{st.2})}{dt} &= \alpha_{t2} S (\Delta T_6 - \Delta T_{st.2}) - \alpha'_{t2} S' (\Delta T_{st.2} - \Delta T_7); \\ \rho_7 V_7 c_7 \frac{d(\Delta T_7)}{dt} &= \alpha'_{t2} S' (\Delta T_{st.2} - \Delta T_7) + c_1 T_{1,0} \Delta F_1 - c_7 F_{7,0} \Delta T_7; \\ \rho_9 V_9 c_9 \frac{d(\Delta T_9)}{dt} &= -\alpha_{t1} S (\Delta T_9 - \Delta T_{st.1}) - c_9 F_{9,0} \Delta T_9 + c_5 T_{5,0} \Delta F_5; \\ \rho_{st} V_{st} c_{st} \frac{d(\Delta T_{st.1})}{dt} &= \alpha_{t1} S (\Delta T_9 - \Delta T_{st.1}) - \alpha'_{t1} S' (\Delta T_{st.1} - \Delta T_4); \\ \rho_4 V_4 c_4 \frac{d(\Delta T_4)}{dt} &= \alpha'_{t1} S' (\Delta T_{st.1} - \Delta T_4) + c_8 F_{8,0} \Delta T_8 - c_4 F_{4,0} \Delta T_4, \end{aligned} \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); F – расход, кг/с; h – энтальпия, Дж/кг; S – наружная поверхность теплообмена, м²; S' – внутренняя поверхность теплообмена, м²; T – температура, °С; t – время, с; V – объем, м³; α – коэффициент теплоотдачи от дизельного топлива, Вт/(м²·К);

α' – коэффициент теплоотдачи к нефти, Вт/(м²·К); Δ – отклонение; ρ – плотность, кг/м³; индексы: 0 – номинальное значение параметра; 1–9 – номера потоков; st.t1 – стенки трубок теплообменника Т-1; st.t2 – стенки трубок теплообменника Т-2.

Систему ОДУ (1) дополним уравнением динамики температуры обессоленной нефти на выходе из ЭД:

$$(\rho_8 V_8 c_8 + \rho_3 V_3 c_3) \frac{d(\Delta T_8)}{dt} = c_7 F_{7,0} \Delta T_7 - c_8 F_{8,0} \Delta T_8 - c_3 F_{3,0} \Delta T_3. \quad (1a)$$

Преобразуем систему ОДУ (1), (1a) к следующему виду:

$$\begin{aligned} \frac{dT_6(t)}{dt} &= -a_{(1)} T_6(t) + a_{(2)} T_{st.t2}(t) + a_{(3)} T_9(t); \\ \frac{dT_{st.t2}(t)}{dt} &= -a_{(4)} T_{st.t2}(t) + a_{(5)} T_6(t) + a_{(6)} T_7(t); \\ \frac{dT_7(t)}{dt} &= -a_{(7)} T_7(t) + a_{(8)} T_{st.t2}(t) + b_{(1)} F_1(t); \\ \frac{dT_9(t)}{dt} &= -a_{(9)} T_9(t) + a_{(10)} T_{st.t1}(t) + b_{(2)} F_5(t); \\ \frac{dT_{st.t1}(t)}{dt} &= -a_{(11)} T_{st.t1}(t) + a_{(12)} T_9(t) + a_{(13)} T_4(t); \\ \frac{dT_4(t)}{dt} &= -a_{(14)} T_4(t) + a_{(15)} T_{st.t1}(t) + a_{(16)} T_8(t); \\ \frac{dT_8(t)}{dt} &= -a_{(17)} T_8(t) + a_{(18)} T_7(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} a_{(1)} &= \frac{\alpha_{12} S + c_6 F_{6,0}}{\rho_6 V_6 c_6}; \quad a_{(2)} = \frac{\alpha_{12} S}{\rho_6 V_6 c_6}; \quad a_{(3)} = \frac{c_9 F_{9,0}}{\rho_6 V_6 c_6}; \quad a_{(4)} = \frac{\alpha_{12} S + \alpha'_{12} S'}{\rho_{st} V_{st} c_{st}}; \quad a_{(5)} = \frac{\alpha_{12} S}{\rho_{st} V_{st} c_{st}}; \\ a_{(6)} &= \frac{\alpha'_{12} S'}{\rho_{st} V_{st} c_{st}}; \quad a_{(7)} = \frac{\alpha'_{12} S' + c_7 F_{7,0}}{\rho_7 V_7 c_7}; \quad a_{(8)} = \frac{\alpha'_{12} S'}{\rho_7 V_7 c_7}; \quad a_{(9)} = \frac{c_9 F_{9,0} + \alpha_{11} S}{\rho_9 V_9 c_9}; \quad a_{(10)} = \frac{\alpha_{11} S}{\rho_9 V_9 c_9}; \\ a_{(11)} &= \frac{\alpha_{11} S + \alpha'_{11} S'}{\rho_{st} V_{st} c_{st}}; \quad a_{(12)} = \frac{\alpha_{11} S}{\rho_{st} V_{st} c_{st}}; \quad a_{(13)} = \frac{\alpha'_{11} S'}{\rho_{st} V_{st} c_{st}}; \quad a_{(14)} = \frac{\alpha'_{11} S' + c_4 F_{4,0}}{\rho_4 V_4 c_4}; \quad a_{(15)} = \frac{\alpha'_{11} S'}{\rho_4 V_4 c_4}; \\ a_{(16)} &= \frac{c_8 F_{8,0}}{\rho_4 V_4 c_4}; \quad a_{(17)} = \frac{c_8 F_{8,0} + c_3 F_{3,0}}{\rho_8 V_8 c_8 + \rho_3 V_3 c_3}; \quad a_{(18)} = \frac{c_7 F_{7,0}}{\rho_8 V_8 c_8 + \rho_3 V_3 c_3}; \quad b_{(1)} = \frac{c_1 T_{1,0}}{\rho_7 V_7 c_7}; \quad b_{(2)} = \frac{c_5 T_{5,0}}{\rho_9 V_9 c_9}. \end{aligned}$$

Принимаем условие, что $T_3 = T_8$. Коэффициенты теплоотдачи, поверхность теплообмена, теплоемкость и другие параметры, необходимые для нахождения коэффициентов $a_{(1)}-a_{(18)}$, $b_{(1)}-b_{(2)}$, определены по общепринятым формулам из [14–16], технологического регламента на действующую маломощную установку ЭЛОУ-АВТ. Коэффициент теплоотдачи к нефти для теплообменника Т-1 составляет 668,3 Вт/(м²·К), для теплообменника Т-2 – 602,1 Вт/(м²·К). Коэффициент теплоотдачи от дизельного топлива для теплообменника Т-1 составляет 812,8 Вт/(м²·К), для теплообменника Т-2 – 760,1 Вт/(м²·К). Определена внутренняя и наружная поверхность теплообмена: 32,91 и 41,68 м² соответственно.

Для нахождения расхода обессоленной нефти F_8 и расхода соленой воды F_3 на выходе ЭД составим уравнение материального баланса ЭД. Согласно ГОСТ 2477–2014 содержание воды в сырой нефти, поступающей на установку, должно быть не более 1 %, в обессоленной нефти – не более 0,02 %.

Исходя из этих условий, составим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} 0,99F_7 &= 0,9998F_8; \\ 0,01F_7 + 0,04F_7 &= F_3 + 0,0002F_8. \end{aligned} \quad (3)$$

Решим систему уравнений (3) в *MATLAB*, используя функцию *mldivide* [17]. На установку поступает сырая нефть в количестве 12,14 кг/с, промывочная вода в количестве 0,4856 кг/с

(4 % от F_7). Получено решение системы (3) для известного значения расхода сырой нефти: $F_8 = 12,02$ кг/с и $F_3 = 0,6046$ кг/с. Найденные значения параметров потоков приведены в таблице.

Параметры потоков
Stream variables

№	ρ , кг/м ³	F , кг/с	T , °С	c , кДж/кг·К
1	874,2	12,14	98,60	1,174
2	998,8	0,4846	93,30	1,079
3	998,8	0,6046	115,7	1,156
4	872,2	12,02	151,2	1,366
5	840,2	8,126	232,7	1,694
6	840,2	8,126	151,2	1,392
7	874,2	12,14	122,9	1,263
8	874,2	12,02	115,7	1,237
9	840,2	8,126	191,6	1,542

Получение математической модели ФЧ. В работе [18] получена секционная модель атмосферной установки малой мощности, включающая посекционные материальные и тепловые балансы и учитывающая состав сырья.

Уравнение теплового баланса для секции дизельного топлива (от 12-й до 23-й тарелки) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} F_B \cdot h_{T12}^V + F_D \cdot h_{T12}^V + F_r \cdot (h_{T12}^V - h_{T13}^L) = \\ = F_B \cdot h_{T23}^V + F_D \cdot h_{T13}^L + F_O \cdot (h_{T23}^V - h_{TO}^L) + F_C \cdot (h_{T13}^L - h_{TC}^L), \end{aligned} \quad (4)$$

где F – расход, кг/с; h – энтальпия, Дж/кг; T – температура, °С; индексы: B – бензиновая фракция из АК (отбор); C – циркуляционное орошение; O – острое орошение; D – дизельное топливо из АК (отбор); r – внутреннее орошение; $T12$, $T13$, $T23$ – температура на 12-й, 13-й и 23-й тарелке АК, °С; TO – температура острого орошения, °С; TC – температура возврата циркуляционного орошения, °С; V – паровая фаза; L – жидкая фаза.

В соответствии с обозначениями параметров в системе (2) принимаем: $F_C = F_5$; $TC = T_6$. Из уравнения (4) можно определить расход внутреннего орошения – флегмы, уходящей с 13-й тарелки АК:

$$F_r = \frac{F_B \cdot h_{T23}^V + F_D \cdot h_{T13}^L + F_O \cdot (h_{T23}^V - h_{TO}^L) + F_5 \cdot (h_{T13}^L - h_{T_6}^L) - (F_B \cdot h_{T12}^V + F_D \cdot h_{T12}^V)}{(h_{T12}^V - h_{T13}^L)}. \quad (5)$$

Для определения энтальпии нефтепродуктов жидкой фазы используется формула Крэга. Для определения энтальпии нефтяных паров используется формула Уэйра и Итона. Отборы бензиновой фракции и дизельного топлива, расход острого орошения могут быть определены из динамической модели процесса ректификации нефти атмосферного блока малого НПЗ, применяемой в структуре системы управления [19]. Математическая модель содержит систему уравнений материального, покомпонентного материального и теплового балансов атмосферного блока.

Затем определим ФЧ R с учетом уравнения (4) в следующем виде:

$$R = \frac{F_r}{F_B + F_D}. \quad (6)$$

Представим систему уравнений (2), (6) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \mathbf{Ax}(t) + \mathbf{Bu}(t); \\ y(t) &= f(x(t), u(t)). \end{aligned} \quad (7)$$

С учетом вычисленных коэффициентов $a_{(1)-a_{(18)}}$, $b_{(1)-b_{(2)}}$ (система уравнений (2)) получены следующие матрицы системы (7):

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0,1754 & 0,1209 & 0 & 0,06037 & 0 & 0 & 0 \\ 0,1867 & -0,3729 & 0,1861 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2302 & -0,383 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,1757 & 0,1212 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2073 & -0,4063 & 0,199 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2129 & -0,3622 & 0,1352 \\ 0 & 0 & 0,3677 & 0 & 0 & 0 & -0,352 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 4,018 \\ 3,727 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$y(t) = R.$$

Таким образом, модель (7) состоит из двух частей: линейной части секции теплообменников и электродегидратора, определяющей температуры теплоносителей, и нелинейной выходной части, определяющей ФЧ в зависимости от температур на входе и возврате ЦО, расходов острого орошения и ЦО, отборов нефтяных фракций.

3. Реализация полученной модели в программе MATLAB/Simulink

В MATLAB получена модель объекта (7) в виде *m*-файла, которая подключается в Simulink с помощью библиотечного блока *S-function* (рис. 2).

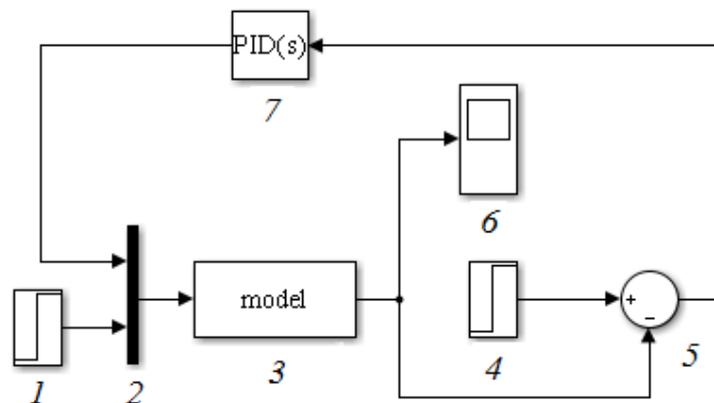


Рис. 2. Динамическая модель секции теплообменников в MATLAB/Simulink:
 1 – блок возмущающего воздействия; 2 – мультиплексор, 3 – модель объекта в Simulink;
 4 – блок задания; 5 – сумматор; 6 – блок для отображения графиков; 7 – регулятор

Fig. 2. Dynamic model of the heat exchanger section in MATLAB/Simulink:
 1 – perturbation action block; 2 – multiplexer, 3 – object model in Simulink; 4 – job block;
 5 – summator; 6 – graph display block; 7 – regulator

В *S*-функции *Flag* указывает задачу, которая должна быть выполнена: *Flag* = 0 – инициализация (задание начальных условий); *Flag* = 1 – вычисление производных (система уравнений (7)); *Flag* = 3 – вычисление выхода *y*.

Зададим исходные данные, разместим в Simulink блоки источников входных сигналов (блоки 1, 4), мультиплексор (блок 2), модель в виде *S-function* (блок 3), дисплей для наблюдения полученных результатов (блок 5), сумматор (блок 6), ПИД-регулятор (блок 7). Поддержание флегмового числа осуществляется путем изменения расхода циркуляционного орошения.

В *Simulink* в *PID*-блоке определяем настройки ПИД-регулятора с помощью инструмента *pidtune*. Заданное значение флегмового числа в секции составляет 0,57. Расход сырой нефти, являющийся возмущением, в момент времени 300 с изменился на 10 %. При входном воздействии построены графики переходных процессов (рис. 3): по параметрам настройки *pidtune* (сплошная линия) и с применением модели (пунктирная линия).

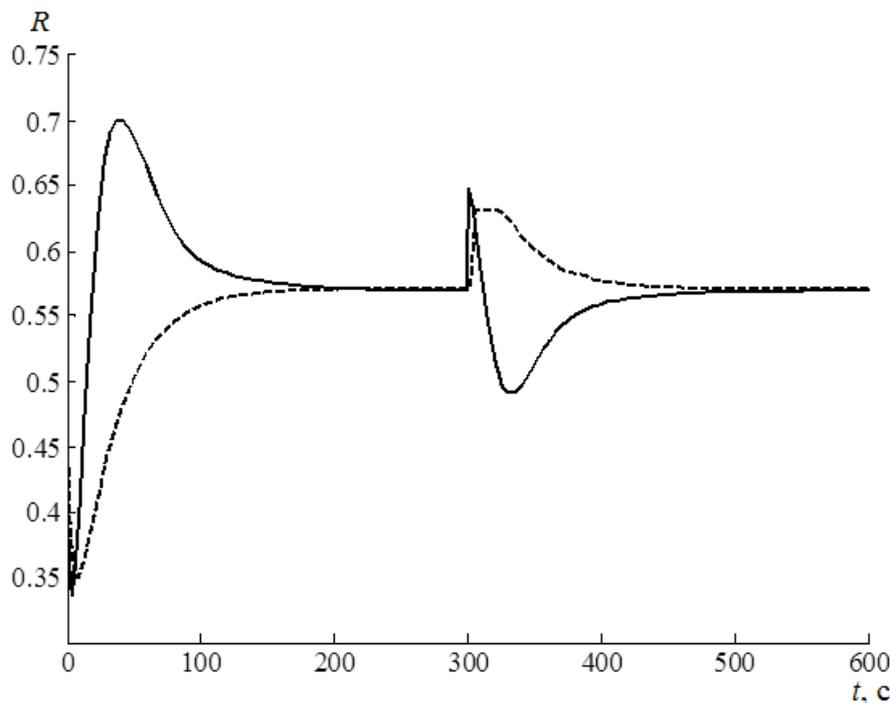


Рис. 3. Графики переходного процесса флегмового числа секции дизельного топлива: сплошная линия – настройка ПИД-регулятора в *MATLAB/Simulink*; пунктирная линия – управление по модели

Fig. 3. Transition graphs for the reflux ratio of the diesel section: solid line – controller of proportional – integrational – differential setting in *MATLAB/Simulink*; phantom line – model control

Результаты получены при потенциальном содержании в составе сырья бензиновой фракции 14,52 %, дизельной фракции – 26,91 %. При изменении состава сырья могут меняться отборы нефтяных фракций, что также учитывается в модели.

Заключение

Получена динамическая модель секции теплообменных аппаратов и электродегидратора в линии циркуляционного орошения атмосферной колонны маломощной нефтеперерабатывающей установки в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений. В модели учтена зависимость флегмового числа секции дизельного топлива атмосферной колонны от параметров технологического процесса (отборов дизельного топлива и бензиновой фракции, расходов острого и циркуляционного орошения, температур верха колонны, острого орошения, входа и возврата циркуляционного орошения). Выполненная в программном пакете *MATLAB/Simulink* модель объекта позволяет исследовать режимы работы установки.

Полученная модель САР может применяться при управлении атмосферным блоком нефтеперерабатывающей установки в условиях воздействия возмущений для улучшения эффективности разделения нефтяных смесей путем стабилизации флегмового числа. На рис. 3 показаны графики переходных процессов для случая настройки параметров ПИД-регулятора в *MATLAB/Simulink* и модели в контуре управления, из чего видно, что показатели переходных процессов в приведенных случаях отличаются.

Литература

1. Шаровина, С.О. Управление температурным профилем ректификационной колонны тарельчатого типа / С.О. Шаровина // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2013. – № 3. – С. 39–47.
2. Основные решения и преимущества СУУТП компании Иокогава / М.Р. Хатимов, А.В. Богачев, Б.М. Низамеев, Д.А. Рыжов // *Экспозиция нефть и газ*. – 2015. – № 5 (44). – С. 92–95.
3. Дмитриевский, Б.С. Задача управления процессом ректификации нефти и метод ее решения / Б.С. Дмитриевский, А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329, № 2. – С. 136–145.
4. Sahoo, A. Modeling and control of a real time shell and tube heat exchanger / A. Sahoo, T.K. Radhakrishnan, C. Sankar Rao // *International Conference on Separation Technologies in Chemical, Biochemical, Petroleum and Environmental Engineering*. – Tomsk, 2017. – Vol. 3. – P. 124–132.
5. Степанец, А.В. Регулирующий адаптивный комплекс на основе каскадной системы с моделью объекта управления / А.В. Степанец // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – № 2/10 (56). – С. 14–17.
6. Skogestad, S. Probably the best simple PID tuning rules in the world / S. Skogestad // *Journal of Process Control*. – 2001. – Vol. 1. – P. 1–27.
7. Кривошеев, В.П. Математическое моделирование процесса циклической ректификации бинарных смесей при непрерывной подаче потоков в колонну / В.П. Кривошеев, А.В. Ануфриев // *Теоретические основы химической технологии*. – 2018. – Т. 52, № 3. – С. 251–259.
8. Гончаров, А.А. Определение транспортного запаздывания при получении виртуального анализатора для процесса ректификации нефти / А.А. Гончаров, Л.Г. Тугашова, И.В. Жуков // *Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт*. – 2018. – № 8. – С. 10–14.
9. Скороспешкин, М.В. Адаптивная система регулирования температуры кожухотрубного теплообменника / М.В. Скороспешкин, Г.П. Цанко, В.Н. Скороспешкин // *Известия Томского политехнического университета*. – 2010. – Т. 316, № 5. – С. 151–156.
10. Giwa, A. Decoupling PID Control of a Reactive Packed Distillation Column / A. Giwa, S. Karacan // *International Journal of Engineering Research & Technology*. – 2012. – Vol. 1 (6). – P. 1924–1933.
11. Тугашова, Л.Г. Исследование возможности управления процессом ректификации нефти с применением типовых регуляторов / Л.Г. Тугашова // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 120–131. DOI: 10.14529/ctcr160313
12. Тугашова, Л.Г. Разработка Matlab-модели аппарата воздушного охлаждения процесса атмосферной перегонки нефти / Л.Г. Тугашова // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. – 2015. – Т. 1, № 3. – С. 105–111.
13. Ясавеев, Х.Н. Модернизация установок переработки углеводородных смесей / Х.Н. Ясавеев, А.Г. Лаптев, М.И. Фарахов. – Казань: Изд-во «ФЭН», 2004. – 307 с.
14. Булыгин, Ю.А. Теплообменные аппараты в нефтегазовой промышленности / Ю.А. Булыгин, С.С. Баранов. – Воронеж: ВГТУ, 2015. – 100 с.
15. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк, М.И. Курочкина. – СПб.: Химия, 1993. – 288 с.
16. Антипов, А.И. Тепловой расчет технологических линий и теплотехнического оборудования объектов промышленной подготовки / А.И. Антипов. – Казань: Изд-во «ФЭН», 2002. – 284 с.
17. Дьяконов, В.П. MATLAB. Полный самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
18. Тугашова, Л.Г. Моделирование системы управления ректификационной колонной в среде Matlab / Л.Г. Тугашова // *Новый Университет. Серия: Технические науки*. – 2016. – № 8–9 (54–55). – С. 18–24.
19. Затонский, А.В. Управление атмосферной колонной малого нефтеперерабатывающего завода с применением динамической модели / А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова // *Интернет-журнал «Наукоедение»*. – 2017. – Т. 9, № 1. – <http://naukovedenie.ru/PDF/71TVN117.pdf>.

Тугашова Лариса Геннадьевна, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и информационных технологий, Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, tugashova@yandex.ru.

Затонский Андрей Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники, Пермский край; zxenon@narod.ru.

Поступила в редакцию 30 сентября 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr200411

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC REFLUX RATIO REGULATION SYSTEM FOR THE RECTIFICATION COLUMN

L.G. Tugashova¹, tugashova@yandex.ru,

A.V. Zatonskiy², zxenon@narod.ru

¹ Almet'yevsk State Oil Institute, Almet'yevsk, Russian Federation,

² Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Perm region, Russian Federation

Introduction. This article provides an overview of the methods of managing the primary petroleum refining. To improve separation efficiency was proposed to stabilize the reflux ratio in the rectifying column. **Purpose of work.** To develop a system for automatic regulation of the reflux ratio of diesel fuel sections in an atmospheric column of the refinery oil. To study the operating modes of an atmospheric column with the participation of the obtained automatic control system. **Materials and methods.** The article presented the features of the oil rectification process at the atmospheric unit of a small capacity refinery. The features of heat dissipation with intermediate circulation flash compared to a large-capacity unit will be shown in this article. The parameters of the facility were selected and divided into groups. A dynamic model of the section of shell-and-tube heat exchangers for heating oil with diesel fuel at a low-power refinery unit in the form of differential equations of heat balance has been developed to achieve the goal set work. An electrode dehydrator material balance equation has been compiled to find desalted oil consumption and saltwater consumption. The dependence of the reflux ratio of diesel fuel sections of the atmospheric column on the inlet and outlet temperatures of the atmospheric column circulation flash, the acute fractionation consumption, circulation flash, and oil fraction selection was obtained. The resulting model of the facility consists of two parts: the linear part of the electric dehydrator and heat exchanger section, which determines the temperatures of the coolants, and the nonlinear output part, which determines the reflux ratio depending on technological parameters. The proposed model makes it possible to investigate the effect of disturbances on the controlled parameters. The *MATLAB/Simulink* software product has been chosen as a tool to implement the model. A system of automatic regulation of the reflux ratio in *MATLAB/Simulink* has been built with the participation of the developed model of the study object. **Conclusion.** The results of modeling a system for automatic regulation of the reflux ratio of diesel fuel sections in the atmospheric column of a low-power refinery unit has been obtained, taking into account the peculiarities of the process under disturbance conditions.

Keywords: fractionation, model control, heat exchanger, circulation flash, reflux ratio, dynamic model, parameter.

References

1. Sharovina S.O. [Control of the Temperature Profile of a Poppet-Type Distillation Column]. *Devices and Systems. Management, Monitoring, Diagnostics*, 2013, no. 3, pp. 39–47. (in Russ.)
2. Hatimov M.R., Bogachev A.V., Nizameev B.M., Ryzhov D.A. [Key Decisions and Benefits SUTP Company Yokogawa]. *Oil and Gas Exposition*, 2015, no. 5 (44), pp. 92–95. (in Russ.)
3. Dmitrievskiy B.S., Zatonskiy A.V., Tugashova L.G. [The Task of Controlling the Process of Oil Rectification and the Method of Its Solution]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 136–145. (in Russ.)

4. Sahoo A., Radhakrishnan T.K., Sankar Rao C. Modeling and Control of a Real Time Shell and Tube Heat Exchanger. *International Conference on Separation Technologies in Chemical, Biochemical, Petroleum and Environmental Engineering*. Tomsk, 2017, vol. 3, pp. 124–132.
5. Stepanec A.V. [A Regulating Adaptive Complex Based on a Cascade System with a Model of a Controlled Object]. *Eastern-European Journal of Advanced Technologies*, 2012, no. 2/10 (56), pp. 14–17. (in Russ.)
6. Skogestad S. Probably the Best Simple PID Tuning Rules in the World. *Journal of Process Control*, 2001, vol. 1, pp. 1–27.
7. Krivosheev V.P., Anufriev A.V. [Mathematical Modeling of the Cyclic Distillation of Binary Mixtures with a Continuous Supply of Streams to the Column]. *Theoretical Foundations of Chemical Technology*, 2018, vol. 52, no. 3, pp. 307–315. (in Russ.)
8. Goncharov A.A., Tugashova L.G., Zhukov I.V. [Determination of Transport Lag when Obtaining a Virtual Analyzer for the Process of Oil Rectification]. *Oil Refining and Petrochemistry. Scientific and Technical Achievements and Best Practices*, 2018, no. 8, pp. 10–14. (in Russ.)
9. Skorospeshkin M.V., Capko G.P., Skorospeshkin V.N. [Adaptive Temperature Control System for Shell-and-tube Heat Exchanger]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 5, pp. 151–156. (in Russ.)
10. Giwa A., Karacan S. Decoupling PID Control of a Reactive Packed Distillation Column. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2012, vol. 1 (6), pp. 1924–1933.
11. Tugashova L.G. Management Feasibility of Oil Fractionation Process Using Standard Controllers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 120–131. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr160313
12. Tugashova L.G. [Development of a Matlab-Model of an Air-Cooling Apparatus for the Atmospheric Distillation of Oil]. *Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia*, 2015, vol. 1, no. 3, pp. 105–111. (in Russ.)
13. Yasaveev H.N., Laptev A.G., Farahov M.I. *Modernizaciya ustanovok pererabotki uglevodorodnyh smesey* [Modernization of Units for Processing Hydrocarbon Mixtures]. Kazan, FEN Publ., 2004. 307 p.
14. Bulygin Yu.A., Baranov S.S. *Teploobmennyye apparaty v neftegazovoy promyshlennosti* [Heat Exchangers in the Oil and Gas Industry]. Voronezh, VSTU, 2015. 100 p.
15. Romankov P.G., Frolov V.F., Flisyuk O.M., Kurochkina M.I. *Metody rascheta processov i apparatov himicheskoy tekhnologii* [Methods for Calculating Processes and Devices of Chemical Technology]. St. Petersburg, Chemistry Publ., 1993. 288 p.
16. Antipov A.I. *Teplovoj raschet tekhnologicheskikh linij i teplotekhnicheskogo oborudovaniya ob"ektov promyslovoj podgotovki* [Thermal Calculation of Technological Lines and Heating Equipment of Field Preparation Facilities]. Kazan, FEN Publ., 2002. 284 p.
17. D'yakonov V.P. *MATLAB. Polnyj samouchitel'* [MATLAB. Complete Tutorial]. Moscow, Press Publ., 2012. 768 p.
18. Tugashova L.G. [Modeling a Rectification Column Control System in Matlab]. *New University. Series: Engineering Sciences*, 2016, no. 8–9 (54–55), pp. 18–24. (in Russ.)
19. Zatonский A.V., Tugashova L.G. [Control of the Atmospheric Column of a Small Oil Refinery Using a Dynamic Model]. *Internet journal "Naukovedenie"*, 2017, vol. 9, no. 1. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/71TVN117.pdf>. (in Russ.)

Received 30 September 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Тугашова, Л.Г. Разработка системы автоматического регулирования флегмового числа ректификационной колонны / Л.Г. Тугашова, А.В. Затонский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 104–114. DOI: 10.14529/ctcr200411

FOR CITATION

Tugashova L.G., Zatonский A.V. Development of an Automatic Reflux Ratio Regulation System for the Rectification Column. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 104–114. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200411

МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Г.Г. Куликов¹, А.В. Речкалов², А.В. Артюхов²

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

² АО «Объединённая двигателестроительная корпорация», г. Москва, Россия

Модельная парадигма цифрового управления в производственных системах основана на интеллектуальной интеграции виртуальных и реальных процессов с объектами производства (их системными 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) и анализируют актуализированные данные реального производства из соответствующих БД и БЗ. Этим обеспечиваются свойства идентифицируемости и прослеживаемости объектов производства и их процессов. Пространственное и временное распределение объектов производства холдинга определяют базовую систему координат для их системного моделирования и управления. Автоматизация интеллектуальных процессов организации, планирования, мониторинга и управления взаимосвязанными производственными объектами в пространстве и времени с учетом влияния внешней среды в реальном и виртуальном аспектах является важной и актуальной задачей. Системное моделирование – одна из основных составляющих организации любого процесса, в том числе и производственного. Необходимо также отметить, что процесс системного моделирования сам по себе является интеллектуальным, трудоемким и объективным процессом. **Цель исследования.** Разработать методологию системного моделирования (системного описания) и адаптивного управления производственной деятельностью отдельными предприятиями в составе машиностроительного холдинга. 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 разнообразия информационных процессов взаимодействия отдельных производственных предприятий в составе холдинга;
- функциональное моделирование динамических систем.

Результаты. Предложена методология системного моделирования (системного описания) многоуровневого адаптивного управления распределенными в пространстве и времени производственными системами с учетом влияния внешней среды. На примере машиностроительного холдинга показано, что данная интеллектуализированная системная динамическая модель может быть реализована в форме *информационно-советующей* системы. **Заключение.** Предложенная методология системного анализа и моделирования адаптивного управления машиностроительным производством в составе холдинга позволяет решать актуальные задачи эффективного управления производственной деятельностью с учетом влияния внешней среды.

Ключевые слова: системное моделирование (системное описание), адаптивное управление, машиностроительный холдинг, производственная система, предметно-ориентированная область, динамическая модель.

Производство как сложная система изначально в той или иной степени обладает свойствами адаптивного поведения. Это означает, что производственный процесс всегда имеет набор возможностей и инструментов и подстраивается под изменения внешней и внутренней среды, чтобы обеспечить запланированные результаты деятельности.

Система управления производством по своей сути выполняет задачу планирования и корректировки производственного процесса в зависимости от изменения внешних и внутренних параметров (спроса, доступности ресурсов, изменения конструкции продукции и т. п.). Такая система

может быть отнесена к классу адаптивных систем, а процесс принятия решений и их исполнения можно охарактеризовать как процесс адаптации. На рис. 1 приведена концептуальная структура функционирования системы управления производством в условиях действия возмущений от внешней и производственной среды.

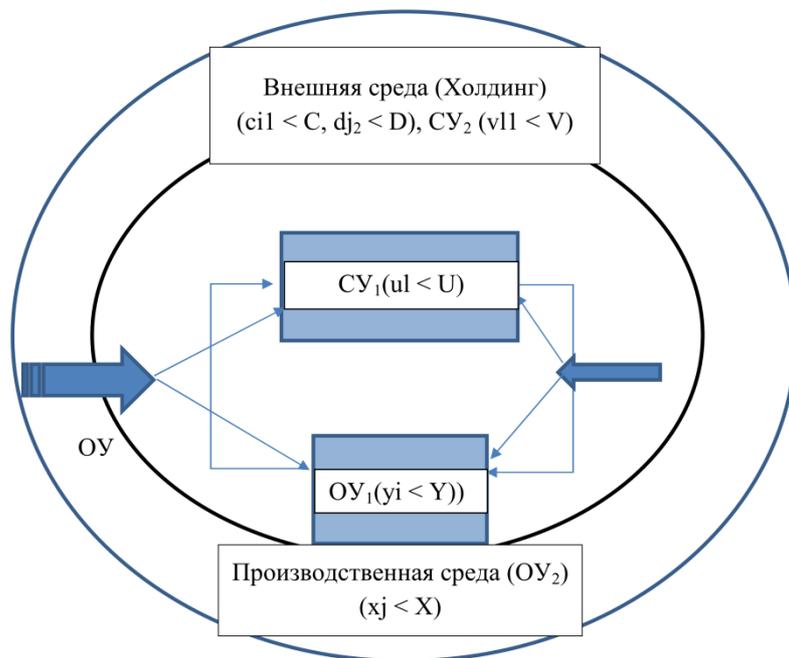


Рис. 1. Концептуальная структура функционирования системы управления производством в условиях действия возмущений от внешней и производственной среды

Fig. 1. The conceptual structure of the production management system functioning under the influence of disturbances from the external and production environment

На рис. 1: CY – система управления производством; OY – объект управления – производство; \rightarrow – реальные и информационные воздействия (связи) на производственную и управленческую деятельность; $Y(i), X(j), U(l)$ – множества дискретных желаемых (плановых), возможных (неплановых, возмущенных) и управляемых в производственной среде состояний; I, J, L – мощности соответствующих множеств; $C(i_1), D(j_1), V(l_1)$ – множества дискретных желаемых (плановых), возможных (неплановых, возмущенных) и управляемых во внешней среде (в холдинге) состояний производственной системы как объекта управления со стороны холдинга; I_1, J_1, L_1 – мощности соответствующих множеств.

Будем считать систему адаптивной, если она может приспосабливаться к изменениям внутренних и внешних условий. Такая система сохраняет работоспособность при непредвиденных изменениях свойств управляемого объекта, целей управления или условий окружающей среды путем смены алгоритма своего функционирования, программы поведения или поиска оптимальных состояний. Адаптивное управление преследует цель компенсации неопределенности или неизбежных изменений параметров состояния производственного процесса, вызванных как внешними факторами, связанными прежде всего с изменениями спроса, так и внутренними факторами, связанными с неопределенностью или динамикой доступности ресурсов [1–3].

Соответственно, адаптация – это процесс формирования и изменения параметров функционирования производственного процесса и воздействий на основе текущей информации с целью достижения определённого, а по возможности оптимального состояния системы для выполнения основной задачи – выпуска продукции.

Можно отметить, что применение принципов адаптивного управления в информационных системах управления производством позволяет:

- обеспечить оптимизацию использования производственных ресурсов;

- повысить оборачиваемость производственных оборотных средств и сократить производственный цикл изготовления продукции;
- обеспечить управленческий персонал достоверной и оперативной информацией о состоянии производственного процесса;
- предоставить инструмент прогнозирования развития производственной ситуации в режиме «что-если» и как результат – повысить эффективность принимаемых управленческим персоналом решений.

Методология адаптивного управления производством должна обеспечивать интеграцию управленческих категорий, законов, принципов и методов, представляющих целостную систему, реализуемую через механизм управления на основе системных динамических моделей в составе ERP системы [4–8].

Для математической формализации системной модели производственной деятельности применим подход Эшби, основанный на определении связей между номинальными, порядковыми, интервальными и кардинальными переменными при описании состояния подсистем – регуляции, адаптации, самоорганизации и др. (по законам Эшби: кибернетика рассматривает не вещи, а способы поведения) [9].

Так, по логике Эшби для адаптации необходимы две петли обратной связи. Первый цикл обратной связи работает часто и вносит небольшие коррективы. Второй цикл работает нечасто и изменяет структуру системы, когда «существенные переменные» выходят за пределы, необходимые для выживания.

ОУ может находиться в планируемом состоянии u_i , $i = \{1, I\}$ допустимого множества Y и в состоянии x_j , $j = \{1, J\}$ возможного множества состояний X , включая планируемые состояния, определяемом производственной средой, тогда в соответствии с законом необходимого разнообразия Эшби для управляемости ОУ необходимо выполнение следующих условий.

Если управление u_k переводит состояние ОУ из x_j в состояние u_i , то есть $u_k: x_j \rightarrow u_i \in Y \subset X$ и известны вероятности их реализаций, тогда ОУ будет неуправляемым, если $H(y) > H(x)$, где $H(\dots)$ – энтропия. Целью управления является снижение энтропии $H(y)$, то есть повышения вероятности нахождения ОУ в состоянии Y , $H(y) < H(x)$, это означает, что

$$H(y) > H(x) - I(u, x), \quad (1)$$

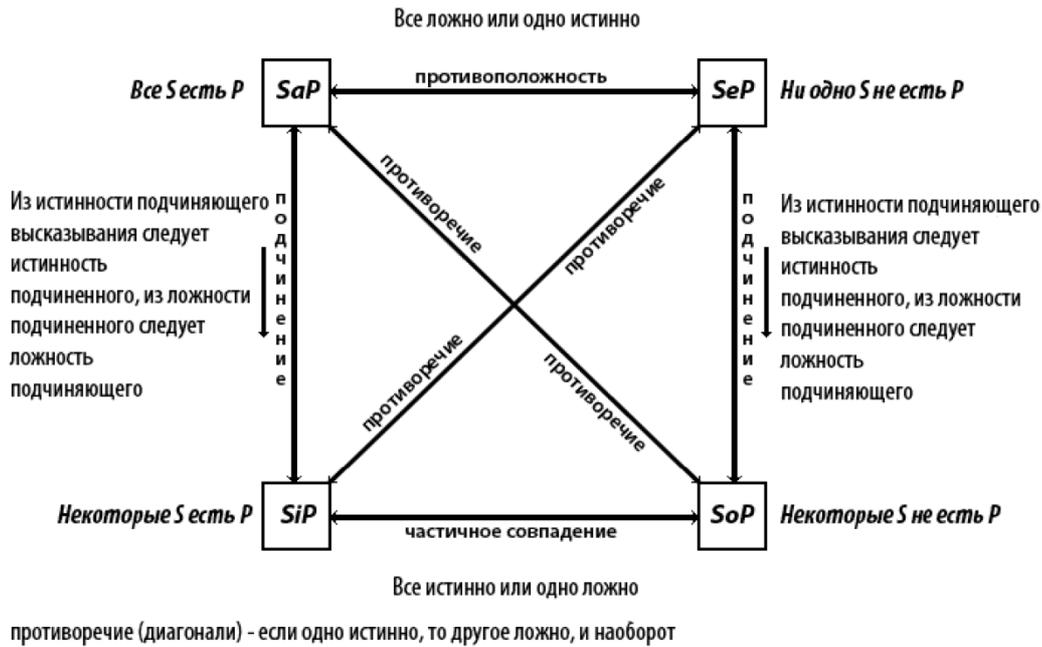
где $I(u, x) = H(u) - H(u/x)$ – количество информации в u об x , а $H(u/x)$ – условная энтропия.

То есть *разнообразие (энтропию) состояний ОУ можно понизить не более чем на величину количества информации в УС об ОУ, которое равно разнообразию (энтропии) управления за вычетом потери информации от неоднозначного управления.*

Таким образом, как в нашем случае, механизм управления по Эшби предполагает режим стабилизации целевых состояний $x_j \in Y$ и преобразования состояний $x_j \in X$, не входящих в множество Y , в Y . То есть условие Эшби обеспечивает стабилизацию целевых (желаемых) состояний $x_j \in Y$ в производственной среде X , то есть адаптацию к этой среде. Если же множество состояний системы ОУ + СУ расширяется до их состояний во внешней среде D , то можно формировать по правилам Эшби систему управления и адаптации второго контура. Обобщая, можно сказать, что адаптивный канал управления – это канал связи состояния системы с внутренним контуром и одновременно с новыми состояниями во внешнем контуре.

Покажем, что данный подход позволяет формализовать структуру модели многоуровневого управления производством на основе наблюдаемости (измеримости) за состоянием желаемых и возможных состояний системы и формирования необходимых и достаточных управлений (управляемости) из условия логической устойчивости (сходимости) к желаемым состояниям. В ТАУ для решения такого класса задач применяют методы теории структурной и параметрической идентификации реальных систем. Очевидно, что наличие логически непротиворечивой (исключающей ошибки первого и второго рода) идентифицированной структуры производственной системы является необходимым условием для построения ее цифрового двойника путем машинного обучения.

Для полного структурного описания логики отношений между множеством возможных состояний производственной системы X и планируемых (целевых) состояний Y применим модель в форме логического квадрата Декарта [10, 11] (рис. 2).



противоречие (диагонали) - если одно истинно, то другое ложно, и наоборот

Рис. 2. Схема отношений между множеством планируемых (целевых) состояний $S = Y$ и возможных состояний производственной системы $P = X$
 Fig: 2. Scheme of relations between the set of planned (target) states $S = Y$ and possible states of the production system $P = X$

Для исключения логических противоречий и обеспечения целостности системы построим модель, удовлетворяющую основным положениям теории категорий множеств.

Необходимое условие исключения структурных противоречий в системе (сохранения целостности исходных объектов и системы в целом) и реализации принципа ОС – отношения между объектами с бинарной внутренней структурой должны быть направленными, мономорфными (инъективными или функциональными) и отвечать условиям композиции.

В нашем случае это объект $Об_1$ – множество плановых состояний Y в множестве состояний ПС X ; $Об_2$ – множество состояний ПС $X_{пр}$ вне множества плановых состояний $X_{пл}(Y)$; $Об_3$ – множество $Y = X_{пл}$.

В этом случае можно построить схему структурной композиции с мономорфными (функциональными) отношениями между обозначенными объектами $Об_1, Об_2, Об_3$ (рис. 3).

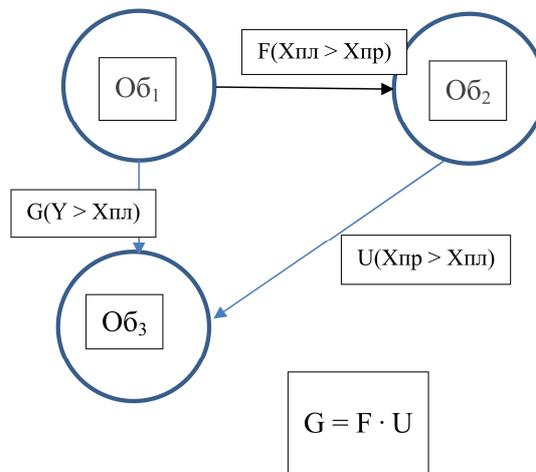


Рис. 3. Схема структурной композиции с мономорфными (функциональными) отношениями
 Fig. 3. Scheme of structural composition with monomorphic (functional) relations

Путем естественных преобразований данная композиция может порождать новый бинарный объект с подмножеством собственных состояний во множестве возможных состояний, определяемых внешней средой.

Отметим также, что указанные выше преобразования раскрывают формальный алгоритм преобразования логического квадрата Декарта до логического треугольника Н.А. Васильева в исследуемой предметной области производственной деятельности.

Основным механизмом реализации адаптивного управления производством является сформированная технология принятия и исполнения управленческих решений на основе качественной информации и использования интеллектуальных информационных систем и систем поддержки принятия решений.

Следовательно, цель адаптивного управления можно сформулировать как поиск вариантов принятия и исполнения управленческих решений, обеспечивающих наиболее эффективное взаимодействие и использование производственных ресурсов. А основной задачей построения системы адаптивного управления в этом случае является непрерывное совершенствование методов и моделей управления производственными процессами на основе использования современных информационных технологий [12–14].

Информационные системы, применяемые в управлении производственными процессами, можно разделить на информационно-справочные, информационно-советующие и информационно-управляющие.

Информационно-справочные системы выполняют задачу обеспечения управленческого персонала необходимой и доступной информацией по запросам, на основании которой анализируется состояние объекта управления (производственного процесса) и формируется управленческое решение.

Информационно-советующие системы по результатам сбора и обработки информации на основе заложенных алгоритмов предлагают рекомендации, которые используются при принятии управленческих решений.

Информационно-управляющие системы позволяют не только воспользоваться рекомендациями при принятии решений, но и формировать управленческие воздействия без предварительной оценки этих решений управленческим персоналом.

Исходя из такой классификации, можно сформировать основной подход к оценке изменения уровня адаптации производственной системы с применением информационных систем как трансформацию информационных систем в информационно-советующие и информационно-управляющие, обеспечивающие рост уровня формализации принимаемых управленческих решений и снижение влияния субъективного фактора на результаты процессов управления. Например, такое положение может относиться к наиболее сложному для оценки персоналом и в то же время наиболее важному для оптимизации производственного процесса параметру в мелкосерийном и единичном производстве – расчету приоритета исполнения производственных заказов на рабочем центре.

Как было отмечено ранее, суть адаптивного управления машиностроительным предприятием – это управленческая деятельность, состоящая в виде взаимосвязанных воздействий на элементы адаптивности управляемого объекта с помощью механизма управления – принятия и исполнения управленческих решений, когда желательное состояние системы определяется на основе накопленного опыта посредством наблюдения за управленческими показателями.

Адаптивная модель системы управления промышленным предприятием основывается на модели анализа состояния производственного процесса и прогноза возможных последствий принятых управленческих решений, что требует решения задачи параметризации, т. е. выявления минимально необходимого набора данных, описывающих задачу управления и в то же время достаточных для оценки результатов принятых решений. Соответственно, методология адаптивного управления должна быть основана на разработке системы количественных и качественных показателей, определяющих в соответствующей системе координат возможные состояния ОУ и его СУ в производственной и внешней средах, выделять в них целевые состояния и формировать допустимые управляемые траектории их достижения.

Метод определения множества возможных состояний производственных систем в составе холдинга по реальным данным

Известно, что производственная система является динамической системой, это значит, что она обладает «производственной» памятью и моделируется дифференциальными уравнениями. Учетные же данные в реальном машиностроительном производстве являются, как правило, дискретными и интегральными и фиксируются в многомерных таблицах (реляционных БД). Схемы таблиц соответствуют упорядоченным конечным номинальным шкалам, то есть известна их мощность (количество элементов). Кроме того, задается их размерность. Графически эти шкалы определяют ортогональную конечную дискретную систему координат, в которой задана в неявной форме дифференциальная функция.

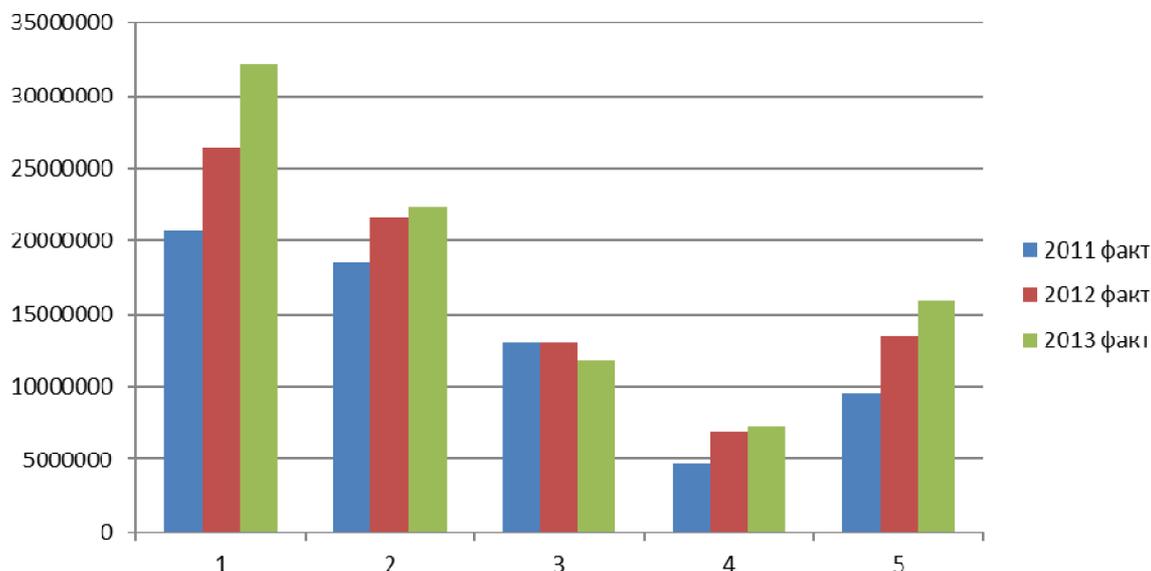
Пример 1

На основе данных, приведенных в работе [15], определим двумерную ортогональную ограниченную дискретную систему координат с упорядоченными номинативными шкалами <Предприятия холдинга, Время> и систему с координатами объекта <Объёмы производства, Запасы, Оборачиваемость>. В этих системах координат заданы параметры реальных интегральных состояний производственной системы в форме совокупности таблиц, связанных реляционными отношениями, и в форме соответствующих диаграмм (рис. 4–6).

В обобщенной форме такое представление соответствует некоторой сложной дискретной модели, задаваемой системой числовых последовательностей, включая и сам натуральный ряд чисел, которая может быть представлена последовательностью

$$\Phi(i, j) = \Phi(\text{Пр}(i) V_{\text{Об.пр}}(I, I, j), V_{\text{Об.зап}}(I, I, j), N(I, I, j)). \quad (2)$$

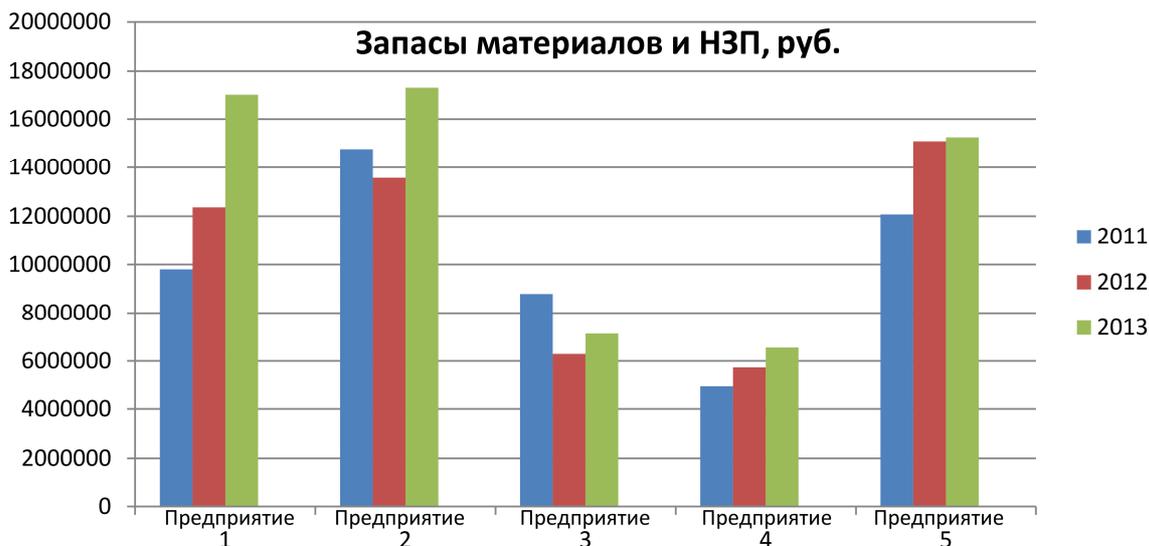
Реальное состояние производственной системы, как было отмечено выше, обладает памятью и соответственно определяется дифференциально-интегральными свойствами, то есть её моделью является сложная аналитическая функция, задаваемая в неявной, дискретной форме.



Пр/Год	1/Пр1	2/Пр1	3/Пр1	4/Пр1	5/Пр1	5/Sum
1/2011	V11/ 21	V12/8	V13/3	V14/4,5	V15/9	65,5
2/2011	26	22	13	4,6	14	79,6
3/2011	32	23	12	4,7	16	87,7
3	69	63	38	13,8	39	232,8/222

Рис. 4. Динамика объемов производства по предприятиям: $V_{\text{Об.пр}}(I, j)$, руб./год – объем производства $I = \{1, 2, \dots, 5\}$ -го предприятия в год и по годам $J = \{2011, 2012, 2013\}$

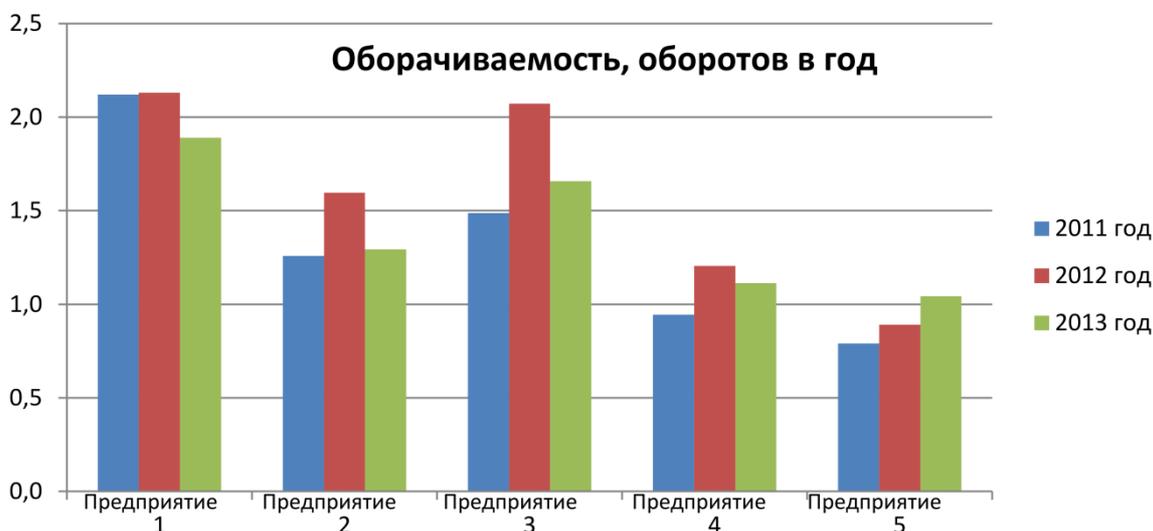
Fig. 4. Dynamics of production volumes by enterprises: $V_{\text{об.пр}}(I, j)$, rub./year – production volume $I = \{1, 2, \dots, 5\}$ enterprise per year and by years $J = \{2011, 2012, 2013\}$



Пр/Год	1/Пр1	2/Пр1	3/Пр1	4/Пр1	5/Пр1	5/Sum
1/2011	9	14,5	8,5	5	12	49
2/2011	12,5	13,5	6	5,8	15	52,8
3/2011	17	17,5	7	6,5	15,5	63,5
3	38,5	45,5	21,5	17,3	42,5	116,3/165,3

Рис. 5. Динамика запасов материалов и НЗП по предприятиям: $V_{Об.зан}(i, I, j)$, руб./год – объём запасов материалов и НЗП $I = \{1, 2, \dots, 5\}$ -го предприятия в год и по годам $J = \{2011, 2012, 2013\}$

Fig. 5. Dynamics of stocks of materials and WIP by enterprises. $V_{Об.зан}(I, I, j)$, rub./year – the volume of stocks of materials and WIP $I = \{1, 2, \dots, 5\}$ enterprise per year and by years $J = \{2011, 2012, 2013\}$



Пр/Год	1/Пр1	2/Пр1	3/Пр1	4/Пр1	5/Пр1	5/Sum
1/2011	2,2	1,25 · Y	1,5 · Y ²	0,9 · Y ³	0,8 · Y ⁴	6,65
2/2011	2,22 · X	1,6	2,1	1,2	0,9	8,02
3/2011	1,8 · X ²	1,3	1,7	1,1	1,1	7
3	6,22	4,15	5,3	3,2	2,8	21,67

Рис. 6. Динамика оборачиваемости запасов материалов и НЗП по группе предприятий: $N(I, I, j)$, К – количество оборотов I -го предприятия в год и по годам $J (I = \{1, 2, \dots, 5\}, J = \{2011, 2012, 2013\})$

Fig. 6. Dynamics of material inventory turnover and work in progress for a group of enterprises: $N(I, I, j)$, К – the number of turnovers of the I -th enterprise per year and by years $J (I = \{1, 2, \dots, 5\}, J = \{2011, 2012, 2013\})$

Для построения аналитической модели применим метод производящих функций.

Для описания интегральных свойств последовательности объёмов производств, запасов и оборачиваемости по предприятиям построим производящие функции от параметра Y в виде:

$$V_{\text{Об.пр}}(y, I, j) = A_0 + A_1 \cdot y + A_2 \cdot y^2 + A_3 \cdot y^3 + A_4 \cdot y^4; \quad (3)$$

$$V_{\text{Об.зап}}(y, I, j) = B_0 + A_1 \cdot y + B_2 \cdot y^2 + B_3 \cdot y^3 + B_4 \cdot y^4; \quad (4)$$

$$N(y, I, j) = C_0 + C_1 \cdot y + C_2 \cdot y^2 + C_3 \cdot y^3 + C_4 \cdot y^4. \quad (5)$$

Отметим, что значения функций как определённых интегралов от $Y = 0$ до $Y = 1$ совпадают с табличными значениями.

Для описания интегральных свойств последовательности объёмов производств, запасов и оборачиваемости по времени (годам) построим производящие функции от параметра X в виде:

$$V_{\text{Об.пр}}(i, x, j) = D_0 + D_1 \cdot x + D_2 \cdot x^2; \quad (3a)$$

$$V_{\text{Об.зап}}(i, x, j) = E_0 + E_1 \cdot x + E_2 \cdot x^2; \quad (4a)$$

$$N(I, x, j) = P_0 + P_1 \cdot x + P_2 \cdot x^2. \quad (5a)$$

Пример 2

Положим, что в информационно-советующей системе возник вопрос: каким образом произойдет перераспределение объёмов производства на предприятиях при условии изменения соотношения на заданную величину L объёмов производств за полный период (за три года) и в течение трёх лет? Насколько при этом изменятся запасы и оборачиваемость?

Составим функциональную модель для искомого состояния производственной системы в соответствии с логикой поставленного вопроса, объединив уравнения (3) и (3a).

$$V_{\text{Об.пр}}(y, I, j) - L \cdot V_{\text{Об.пр}}(i, x, j) = 0 \quad (6)$$

или

$$(A_0 + A_1 \cdot y + A_2 \cdot y^2 + A_3 \cdot y^3 + A_4 \cdot y^4) - L \cdot (D_0 + D_1 \cdot x + D_2 \cdot x^2) = 0. \quad (6a)$$

Полагаем, что $y(x)$ функционально зависит от x , тогда ответом на поставленный вопрос будут решения дифференциального уравнения (7), в свою очередь являющегося решением (6a):

$$dy(x)/dx = ((L(D_1 + 2D_2x))/(A_1 + 2A_2y + 3A_3y^2 + 4A_4y^3)). \quad (7)$$

Выводы

1. Предложена методология системного анализа и моделирования адаптивного управления машиностроительным производством в составе холдинга на основе идентификации и анализа конечных множеств возможных и плановых производственных состояний как для отдельных предприятий, так и холдинга в целом.

2. Разработан метод построения многоуровневой структуры адаптивного управления производством на основе принципа необходимого разнообразия Эшби.

3. Разработан метод структурно-параметрической идентификации динамической модели производственной системы по реальным данным на основе теории последовательностей и порождающих функций.

4. Показано, что предложенная динамическая модель является основой для построения информационно-советующей системы.

5. Предложенная методология вносит определенный вклад в теорию построения цифровых двойников технологических и производственных процессов на основе методов машинного обучения.

Литература

1. Городилов, А.Б. Адаптивное управление наукоёмким машиностроительным производством: моногр. / А.Б. Городилов, В.С. Веселовская. – М.: Русайнс, 2017. – 103 с.

2. Жмурко, Д.Ю. Понятие, сущность и классификация адаптивного управления системами с организационной сложностью / Д.Ю. Жмурко // Политематический сетевой электронный научный журнал кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 90. – С. 818–836.

3. Волкова, В.Н. Теория информационных процессов и систем: учеб. и практикум для академ. бакалавриата / В.Н. Волкова. – М.: Юрайт, 2016. – 502 с.

4. Речкалов, А.В. Разработка формальной интегральной модели производственного процесса машиностроительного предприятия / А.В. Речкалов, В.В. Антонов, А.В. Артюхов // Вестник УГАТУ. – 2014. – Т. 18, № 4 (65). – С. 125–133.

5. Разработка формальной модели производственного процесса для организации проектного и производственного менеджмента с применением интеллектуальной КИС / А.В. Речкалов, Г.Г. Куликов, В.В. Антонов, А.В. Артюхов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 11. – С. 34–54.

6. Артюхов, А.В. Оборачиваемость оборотных производственных средств как ключевой индикатор и измеритель уровня организации процессов управления производственными системами / А.В. Артюхов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015 – Т. 17, № 2–5. – С. 1193–1199.

7. Разработка формальной модели производственного процесса для организации проектного и производственного менеджмента с применением рекурсивной системной модели / А.В. Артюхов, В.В. Антонов, А.В. Речкалов, Г.Г. Куликов // Актуальные вопросы науки, технологии и производства. V международная научно-практическая конференция: сб. тр. – СПб., 2015. – С. 29–31.

8. Формальная модель производственного процесса для организации проектного и производственного менеджмента / Г.Г. Куликов, А.В. Речкалов, В.В. Антонов, А.В. Артюхов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2014. – № 4. – С. 175–186.

9. Эшби, У.Р. Введение в кибернетику. – М.: КомКнига, 2006. – 432 с.

10. Логический квадрат *Logical square* – https://ic.pics.livejournal.com/poun/2971406/53967/53967_original.gif (дата обращения: 01.01.2020).

11. Категория множеств. Википедия. – http://ru.wikipedia.org/wiki/Категория_множеств (дата обращения: 01.01.2020).

12. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288–2005. Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем.

13. 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.

14. 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. DOI: 10.14529/ctcr200205

15. Артюхов, А.В. Методы и модели организации производственного процесса многономенклатурного машиностроительного предприятия как объекта управления: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.В. Артюхов. – Самара, 2017. – 20 с.

Куликов Геннадий Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; gennadyg_98@yahoo.com.

Речкалов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, главный специалист, АО «Объединённая двигателестроительная корпорация», г. Москва; av@rechkalov.ru.

Артюхов Александр Викторович, канд. техн. наук, генеральный директор, АО «Объединённая двигателестроительная корпорация», г. Москва.

Поступила в редакцию 23 сентября 2020 г.

METHODOLOGY OF SYSTEM MODELING OF ADAPTIVE MANAGEMENT OF MACHINE-BUILDING PRODUCTION

G.G. Kulikov¹, gennadyg_98@yahoo.com,

A.V. Rechkalov², av@rechkalov.ru,

A.V. Artyukhov²

¹ Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation,

² United Engine Corporation JSC, Moscow, Russian Federation

The Model Paradigm of digital control in production systems is based on the intelligent integration of virtual and real processes with production objects (their system models). In this case, the platform (environment) for the intelligent integration of virtual and real processes is the information environment of the subject-oriented area. The functions of specialists, in this case, are reduced to the role of experts who implement the formal predicate knowledge prescribed in the corresponding methods and job descriptions (documents) and analyze the updated data of real production from the corresponding databases and knowledge bases. This ensures the properties of identifiability and traceability of production facilities and their processes. The spatial and temporal distribution of the holding's production facilities determine the basic coordinate system for their system modeling and management. Automation of intellectual processes of organization, planning, monitoring and management of interconnected production facilities in space and time, taking into account the influence of the external environment, in real and virtual aspects, is an important and urgent task. System modeling is one of the main components of the organization of any process, including production. It should also be noted that the system modeling process itself is an intellectual, laborious and objective process. **Purpose of the study.** To develop a methodology for system modeling (system description) and adaptive management of production activities by individual enterprises as part of a machine-building holding. Develop a methodology for implementing this system model. **Research methods used in the work:**

- principles of system engineering methodology (process approach, life cycle, etc.);
- an integrated approach and structural analysis of the diversity of information processes in the interaction of individual production enterprises within the holding;
- functional modeling of dynamic systems.

Results. A methodology of system modeling (system description) of multilevel adaptive control of production systems distributed in space and time is proposed, taking into account the influence of the external environment. On the example of a machine-building holding, it is shown that this intellectualized system dynamic model can be implemented in the form of an Information-Advisory System. **Conclusion.** The proposed Methodology of System Analysis and Modeling of Adaptive Management of Machine-Building Production as a part of the holding allows solving urgent problems of effective management of production activities, taking into account the influence of the external environment.

Keywords: system modeling (system description), adaptive control, machine building holding, production system, subject-oriented area, dynamic model.

References

1. Gorodilov A.B. *Adaptivnoye upravleniye naukoyemkim mashinostroitel'nym proizvodstvom: monografiya* [Adaptive Management of High-Tech Machine-Building Production: Monograph]. Moscow, 2017. 103 p.
2. Zhmurko D.Yu [Concept, Essence and Classification of Adaptive Management of Systems with Organizational Complexity]. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*, 2013, no. 90, pp. 818–836. (in Russ.)
3. Volkova V.N. *Teoriya informatsionnykh protsessov i sistem: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata* [Theory of Information Processes and Systems: Textbook and Workshop for Academic Undergraduate]. Moscow, Yurayt Publ., 2016. 502 p.
4. Rechkalov A.V., Antonov V.V., Artyukhov A.V. [Development of a Formal Integral Model of

the Production Process of a Machine-Building Enterprise]. *Bulletin of UGATU*, 2014, vol. 18, no. 4 (65), pp. 125–133. (in Russ.)

5. Rechkalov A.V., Kulikov G.G., Antonov V.V., Artyukhov A.V. [Development of a Formal Model of the Production Process for the Organization of Project and Production Management with the Use of Intellectual CIS]. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical Engineering, Information Technology, Control Systems*, 2014, no. 11, pp. 34–54. (in Russ.)

6. Artyukhov A.V. [Turnover of Current Production Assets as a Key Indicator and Measure of the Level of Organization of Processes for Managing Production Systems]. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2015, vol. 17, no. 2–5, pp. 1193–1199. (in Russ.)

7. Artyukhov A.V., Antonov V.V., Rechkalov A.V., Kulikov G.G. [Development of a Formal Model of the Production Process for the Organization of Project and Production Management Using a Recursive System Model]. *Current Issues of Science, Technology and Production. V International Scientific and Practical Conference: Collection of Works*, 2015, pp. 29–31. (in Russ.)

8. Kulikov G.G., Rechkalov A.V., Antonov V.V., Artyukhov A.V. [Formal Model of the Production Process for the Organization of Project and Production Management]. *Bulletin of the Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*, 2014, no. 4, pp. 175–186. (in Russ.)

9. Ashby U.R. *Vvedeniye v kibernetiku* [Introduction to Cybernetics]. Moscow, Komkniga, 2006. 432 p.

10. *Logicheskiy kvadrat* [Logical square]. Available at: https://ic.pics.livejournal.com/poun/2971406/53967/53967_original.gif (accessed 01.01.2020).

11. *Kategoriya mnozhestv*. *Vikipediya* [The category of sets. Wikipedia]. Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Категория_множеств (accessed 01.01.2020).

12. *GOST R ISO/IEC 15288–2005. Informatsionnaya tekhnologiya. Sistemnaya inzheneriya. Protsessy zhiznennogo tsikla sistem* [Information Technology. System Engineering. The Process of the Systems Life Cycle]. (in Russ.)

13. Kulikov G.G., Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A.A., Mavrina A.S., Zagidullin D.I. [Approach to the Application of the Concept of Digital Twins for the Transformation of the Corporate Information System under the Requirements of Industry 4.0 (on the Example of Creating a Single Information Space “University – Enterprise”)]. *Vestnik UGATU*, 2019, vol. 23, no. 4 (86), pp. 154–160. (in Russ.)

14. 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. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 45–55. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200205

15. Artyukhov A.V. *Metody i modeli organizatsii proizvodstvennogo protsessa mnogonomenklaturnogo mashinostroitel'nogo predpriyatiya kak obyekta upravleniya*. *Avtoref. cand. diss.* [Methods and Models for Organizing the Production Process of a Multi-Product Machine-Building Enterprise as an Object of Management. Abstract of cand. diss.]. Samara, 2017. 20 p.

Received 23 September 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Куликов, Г.Г. Методология системного моделирования адаптивного управления машиностроительным производством / Г.Г. Куликов, А.В. Речкалов, А.В. Артюхов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 115–125. DOI: 10.14529/ctcr200412

FOR CITATION

Kulikov G.G., Rechkalov A.V., Artyukhov A.V. Methodology of System Modeling of Adaptive Management of Machine-Building Production. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 115–125. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200412

РАЗРАБОТКА МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА WINNOWERING ДЛЯ АГРЕГИРОВАНИЯ ДАННЫХ БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ИЗ СИСТЕМ ЦИТИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ

И.П. Болодурина, Ю.П. Иванова (Луговскова), Л.М. Анциферова, В.Д. Блинов
Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия

В настоящее время переход к представлению библиографической информации о научных работах к электронному виду послужил причиной повышенного интереса к наукометрическим исследованиям. При этом существующие наукометрические методы подвергаются критике со стороны ученых, так как неполная библиографическая база и инструменты ее оценивания не позволяют наиболее точно оценить вклад научного труда. Проблема качества наукометрических оценок, как правило, основывается на исследовании данных некоторой системы цитирования, которая не включает полные сведения обо всех публикациях авторов, содержащихся в других системах цитирования. **Цель исследования.** Данное исследование направлено на разработку адаптивного подхода для формирования агрегированных данных библиографической информации научной организации в условиях неполной информации из систем цитирования РИНЦ, «Академия Google» и Scopus. **Методы.** Определение агрегированного списка публикаций для анализа наукометрических показателей проведено методом Winnowing, алгоритмом Левенштейна, методом шинглов и Джаро – Винклера. В рамках экспериментального исследования проведена оценка эффективности применения рассмотренных методов для агрегирования информации систем цитирования на основе анализа точности, полноты и F-меры. **Результаты.** Эксперименты на тестовых данных списка публикаций авторов Оренбургского государственного университета из систем цитирования РИНЦ, «Академия Google» и Scopus показали, что наиболее точные списки публикаций по критерию F-меры сформировал метод Winnowing. Для повышения производительности данного алгоритма проведена двухэтапная оптимизация процесса агрегирования, которая позволила улучшить время работы алгоритма при формировании списка библиографических описаний. **Заключение.** Предложенный подход для формирования агрегированных данных библиографической информации научной организации в условиях неполной информации из систем цитирования РИНЦ, «Академия Google» и Scopus позволяет повысить производительность при формировании списка публикаций авторов и показывает хорошую эффективность при определении наукометрических характеристик авторов.

Ключевые слова: система цитирования, наукометрические методы, агрегирование библиографической информации, модификация метода Winnowing, метод Левенштейна, метод шинглов.

Введение

В настоящее время исследования в области наукометрии стали наиболее актуальной областью для дискуссий среди научного сообщества. Связано это с тем, что существующие системы цитирования научных работ представили библиографическую информацию в электронном виде и стали разрабатывать новые инструменты для удобной работы с ней [1]. При этом существующие наукометрические методы [2, 3], как правило, основываются на неполной библиографической базе и не позволяют наиболее точно оценить вклад научного труда. Однако необходимость оценить хотя бы косвенно качественную сторону публикаций авторов остается и, следовательно, возникает потребность в разработке новых, более объективных алгоритмов формирования агрегированных данных библиографической информации научной организации в условиях неполной информации из систем цитирования РИНЦ, «Академия Google» и Scopus.

Основными недостатками существующих наукометрических методов оценки качества научных публикаций являются:

– проблема отсутствия полной библиографической базы, связанная с публикацией научных работ только в тех системах цитирования, на основании которых они индексируются [4, 5];

– низкие показатели производительности существующих методов агрегирования библиографической информации и отсутствие наиболее точных инструментов оценки [6];

– вольная интерпретация результатов анализа наукометрических показателей [7] при составлении рейтингов на основании какой-либо библиографической базы.

Для решения поставленной проблемы воспользуемся математическим аппаратом нечеткой логики для формирования агрегированного списка библиографических описаний с использованием различных функций хэширования, а также современными технологиями проектирования баз данных и параллельного программирования.

1. Обзор исследований

Исследованиями и разработкой наукометрических методов с целью формирования агрегированных данных библиографической информации научной организации в условиях неполной информации из различных систем цитирования занимаются по всему миру.

В исследовании [8] авторы рассмотрели возможности применения данных двух систем цитирования библиографической информации Scopus и Web of Knowledge при оценивании вклада научного труда автора или некоторой организации. Результаты исследования показали, что наиболее полную на данный момент информацию предоставляет ресурс «Российского индекса научного цитирования», однако не всегда полученные списки библиографических описаний показывают исчерпывающую информацию.

Однако проблема манипуляций с библиометрическими показателями связана с неоправданно широким использованием библиометрических данных различными контролирующими институтами [9, 10]. В связи с этим точность данных, которые получает РИНЦ, напрямую зависит от организации, а также его ответственного представителя.

Авторы статьи [11] провели большой обзор основных наукометрических показателей, позволяющих учитывать количество публикаций и цитирований. Разработан новый подход к учету дополнительной информации по соавторам, по уровню журнала, продолжительности научной карьеры и т. п. Выявлена проблема скрытых и неформальных ссылок, а также ошибок в списке источников. В частности, в работе [12] исследователя А.С. Холодова предложено исключить из рассмотрения импакт-факторы журналов, описывающие ранжирование типов публикаций и не влияющие на значимость научного труда автора.

В публикации [13] представлены данные вычислений и анализа индексов Хирша для преподавателей в области методологии поведенческих наук в Испании. Результаты показывают, что индекс Хирша существенно увеличивается за счет самоцитирования и среднее значение у профессоров существенно не превышает среднее значение показателя у доцентов. Эффективность вычисления индекса Хирша подтверждена в работе [14], где проанализирована возможность учитывать авторство цитируемых статей подробно.

В исследовании [15] проанализированы автоматизированные системы агрегирования цитирований российских ученых, направленные на оптимизацию списка научных работ, их цитирования, а также вычисления наукометрических показателей. Авторы предложили подход, позволяющий не только оптимизировать список библиографических описаний, но и агрегировать результаты из нескольких систем цитирования.

Таким образом, обзор исследований показал, что использование различных подходов к вычислению публикационной активности и агрегированию библиографических данных играет важную роль в оценке качества научного потенциала.

Данное исследование направлено на разработку адаптивного подхода для формирования агрегированных данных библиографической информации научной организации в условиях неполной информации из систем цитирования РИНЦ, «Академия Google» и Scopus.

2. Постановка задачи поиска нечетких публикаций на основе данных систем цитирования

Рассмотрим задачу поиска дубликатов библиографических описаний для анализа сходства научных публикаций в системах цитирования РИНЦ, Scopus и «Академия Google». Стоит отметить, что при анализе схожих публикаций необходимо учитывать:

- 1) порядок слов, транспозиции символов, а также орфографические ошибки;
- 2) наличие одинаковых ФИО у разных авторов;
- 3) согласованность ФИО автора работы;
- 4) отсутствие полного текста научной публикации.

Пусть необходимо определить, является ли библиографическая запись \bar{X}_i и \bar{X}_j дубликатом или нечетким дубликатом. Это означает, что необходимо вычислить меру близости $\rho(\bar{X}_i, \bar{X}_j) \in [0; 1]$, характеризующую степень сходства библиографических описаний запись \bar{X}_i и \bar{X}_j .

Будем считать, что две публикации \bar{X}_i и \bar{X}_j являются *полными дубликатами*, если мера близости $\rho(\bar{X}_i, \bar{X}_j) = 1$. При этом две публикации \bar{X}_i и \bar{X}_j являются *нечеткими дубликатами*, если мера близости $\rho(\bar{X}_i, \bar{X}_j) > \theta$, где θ – пороговое значение для оценки сходства. Как правило, значение θ подбирается экспериментальным путем и является главным недостатком алгоритмов нечеткого вывода.

Задача построения такой меры близости $\rho(\bar{X}_i, \bar{X}_j)$ и определения соответствующего порогового значения θ является задачей поиска дубликатов библиографических описаний для анализа сходства научных публикаций в различных системах цитирования, которую можно решать с помощью синтетических и лексических методов. В рамках данного исследования проанализировано применение специализированных метрик Левенштейна и Джаро – Винклера, метода шинглов и модификации WInnowing.

3. Методы выявления нечетких дубликатов

Метод шинглов

Основная идея *метода шинглов* заключается в том, чтобы представить библиографическое описание в виде последовательностей длиной k (шинглов), которые состоят из соседствующих слов. При этом два описания \bar{X}_i и \bar{X}_j являются нечеткими дубликатами, если множества их шинглов в большей части пересекаются между собой.

Метод Джаро – Винклера

Метод Джаро – Винклера представляет собой меру схожести строк для измерения расстояния между двумя последовательностями символов. Можно считать, что расстояние Джаро между двумя словами (лексемами) вычисляется как минимальное количество односимвольных операций, необходимых для преобразования одного слова в другое.

Метод Левенштейна

Метрика, вычисляющая минимальное количество замен, вставок и удалений, необходимых для преобразования одной строки в другую, называют *метрикой Левенштейна*. При этом анализируемые строки считаются дубликатами, если метрика Левенштейна равна нулю.

Метод WInnowing

Данный алгоритм является модификацией метода шинглов, однако представленные последовательности шинглов хэшируются и разбиваются на «окна» размером $(t - k + 1)$, где t – шумовой порог (минимальная длина подстроки, при которой общие подстроки не игнорируются). После этого из каждого окна выбираются минимальные значения соответствующих хэш-функций, которые сравниваются на основе коэффициента ассоциативности Джаккара.

Критерии оценки качества и эффективности алгоритмов выявления нечетких дубликатов

Для оценки качества и эффективности описанных выше алгоритмов выявления нечетких дубликатов для формирования агрегированного списка библиографических описаний выделим основные критерии качественной оценки в табл. 1.

Критерии оценки выявления нечетких дубликатов

Таблица 1

Evaluation criteria for detecting fuzzy duplicates

Table 1

Наименование критерия	Формула расчёта
Точность	$prec = \frac{\text{истинно положительных}}{\text{положительных}}$
Полнота	$rec = \frac{\text{истинно положительных}}{\text{истинных}}$
F-мера	$F = \frac{2 \cdot prec \cdot rec}{prec + rec}$

Наиболее достоверным критерием оценки качества построенного агрегированного списка библиографических описаний является «F-мера», так как данный критерий одновременно учитывает влияние точности и полноты.

Отметим, что точность вычисляется как отношение количества верно добавленных публикаций в общий список ко всему количеству выбранных публикаций. При этом полнота вычисляется как отношение количества верно добавленных публикаций в общий агрегированный список библиографических описаний к общему количеству истинных публикаций, которые должны были присутствовать в агрегированном списке публикаций.

4. Вычислительные эксперименты

Вычислительные эксперименты, выполненные в работе, проводились на тестовой выборке списка публикаций одного из авторов Оренбургского государственного университета, имеющего достаточное количество публикаций в системах цитирования – 439 (213 – в РИНЦ, 220 – в «Академия Google», 6 – в Scopus).

Результаты работы представленных выше алгоритмов для построения агрегированного списка библиографических описаний с рассчитанными критериями эффективности представлены в табл. 2.

Результаты работы методов выявления нечетких дубликатов

Таблица 2

The results of the methods for detecting fuzzy duplicates

Table 2

Названия метода	Точность	Полнота	F-мера
Метод шинглов	0,918	0,948	0,932
Метод Джаро – Винклера	0,901	0,936	0,923
Метод Левенштейна	0,897	0,979	0,936
Метод Winnowing	0,920	0,957	0,938

Среди рассмотренных методов выявления нечетких дубликатов наиболее эффективным по критерию F-меры является метод Winnowing. В рамках данного исследования представлена его модификация с целью повышения производительности алгоритма и понижения времени работы. В связи с тем, что существующие алгоритмы нечеткого поиска дубликатов требуют значительных вычислительных ресурсов, проведем двухэтапную оптимизацию:

- 1) отказ от канонизации исходного текста библиографического описания;
- 2) проведение распараллеливания алгоритма Winnowing.

Результаты исследований показали, что применение канонизации не позволяет существенно улучшить показатели точности и полноты и, следовательно, позволяет отказаться от этого этапа без ущерба качества реализации. С другой стороны, на данный момент существует множество инструментов повышения скорости работы алгоритмов, таких как специализированная библиотека Numba, которая позволяет автоматически оптимизировать и распараллелить программный код.

Краткие сообщения

Сравнительный анализ времени выполнения классического метода Wnnowing с оптимизированным вариантом на разных выборках публикаций авторов Оренбургского государственного университета представлен на рис. 1.

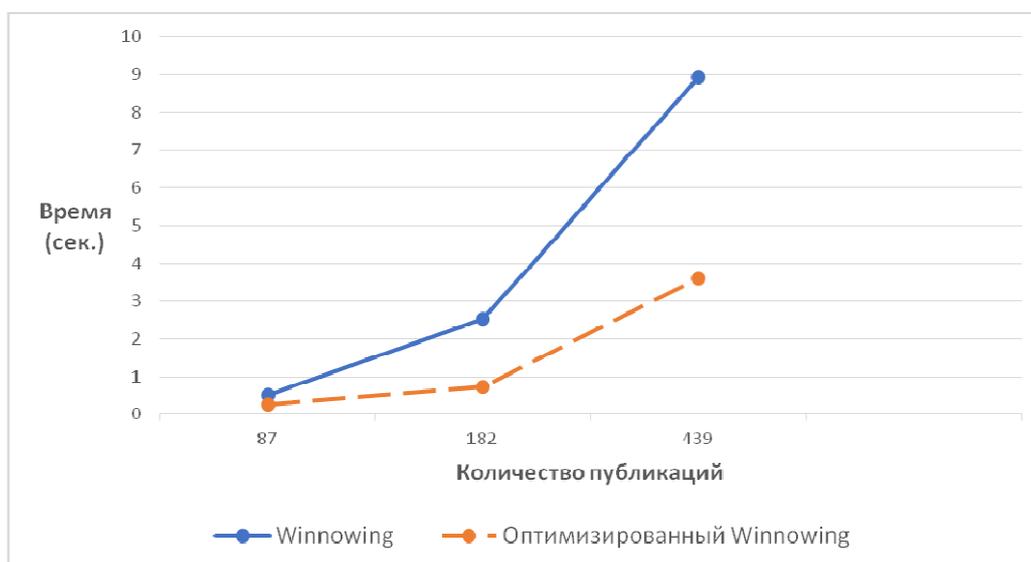


Рис. 1. Сравнительный анализ производительности алгоритмов
Fig. 1. Comparative analysis of algorithms performance

Таким образом, в результате исследования алгоритмов построения агрегированного списка библиографических описаний оптимизированный метод Wnnowing показал приемлемое значение показателя F -меры и наиболее высокую производительность.

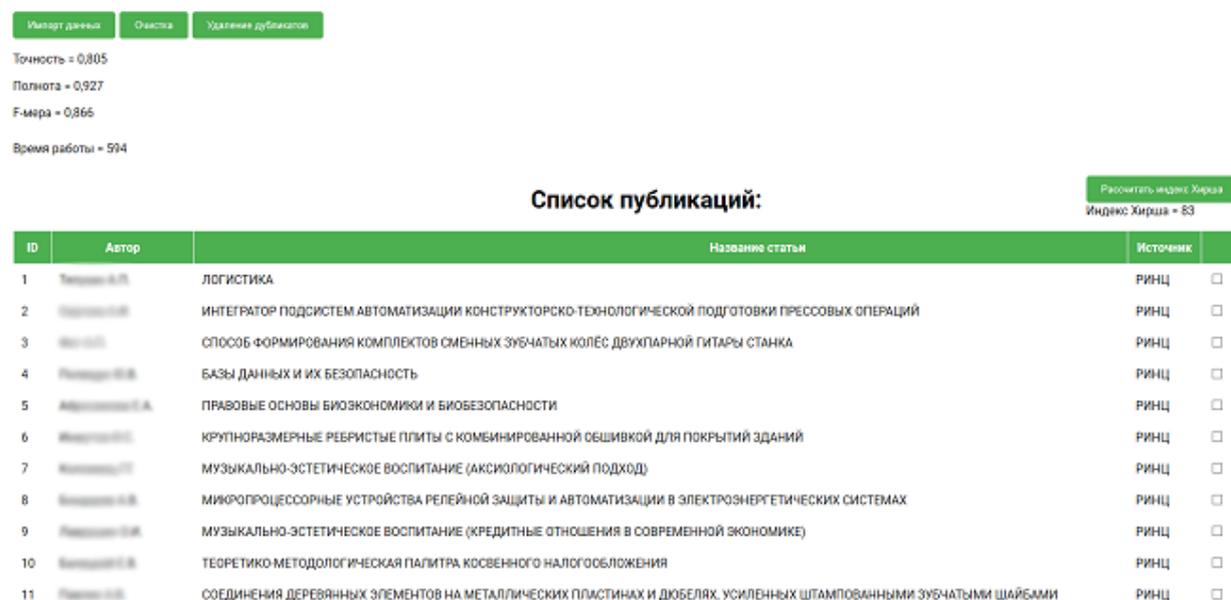


Рис. 2. Автоматизированная система построения агрегированного списка публикаций
Fig. 2. Automated system for building an aggregated list of publications

В результате выполнения представленного алгоритма формируется агрегированный список неповторяющихся научных трудов автора, причём для каждой публикации вычисляется количество цитирований в различных системах. Разработана автоматизированная система (рис. 2), реализующая возможность расчёта основных наукометрических показателей организации на основе библиографических описаний из систем цитирования РИНЦ, Scopus и «Академия Google».

Заключение

В рамках данного исследования разработан адаптивный подход для формирования агрегированных данных библиографической информации научной организации в условиях неполной информации из систем цитирования РИНЦ, «Академия Google» и Scopus.

Определение агрегированного списка публикаций для анализа наукометрических показателей проведено методом Winnowing, алгоритмом Левенштейна, методом шинглов и Джаро – Винклера. В рамках экспериментального исследования проведена оценка эффективности применения рассмотренных методов для агрегирования информации систем цитирования на основе анализа точности, полноты и F-меры.

Эксперименты на тестовых данных списка публикаций авторов Оренбургского государственного университета из систем цитирования РИНЦ, «Академия Google» и Scopus показали, что наиболее точные списки публикаций по критерию F-меры сформировал метод Winnowing. Для повышения производительности данного алгоритма проведена двухэтапная оптимизация процесса агрегирования, которая позволила улучшить время работы алгоритма при формировании списка библиографических описаний.

Предложенный подход для формирования агрегированных данных библиографической информации научной организации в условиях неполной информации из систем цитирования РИНЦ, «Академия Google» и Scopus позволяет повысить производительность при формировании списка публикаций авторов и показывает хорошую эффективность при определении наукометрических характеристик авторов.

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. Yang, K. *Citation Analysis: A Comparison of Google Scholar, Scopus, and Web of Science* / K. Yang, L.I. Meho // *Proceedings of the American Society for Information Science and Technology*. – 2006. – Vol. 43, no. 1. – P. 1–15.

2. *Collection statistics for fast duplicate document detection* / A. Chowdhury, O. Frieder, D. Grossman, C. McCabe // *ACM Trans. Inform. Syst.* – 2002. – Vol. 20, no. 2. – P. 171–191.

3. Kotsemir, M.N. *Publication Activity of Russian Researches in Leading International Scientific Journals* / M.N. Kotsemir // *Acta naturae*. – 2012. – Vol. 4, no. 2 (13). – P. 15–35.

4. Мазов, Н.А. Программы для наукометрических и библиометрических исследований: краткий обзор и сравнительный анализ / Н.А. Мазов, В.Н. Гуреев // *Труды 15-й Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции»*. – 2013. – С. 23–28.

5. Косинов, Д.И. Использование статистической информации при выявлении схожих документов / Д.И. Косинов // *Сборник «Интернет-математика»*. – 2007. – С. 84–90.

6. Baneyx, A. «Publish or Perish» as citation metrics used to analyze scientific output in the humanities: international case studies in economics, geography, social sciences, philosophy, and history / A. Baneyx // *Archivum Immunologiae et Therapiae Experimentalis*. – 2008. – Vol. 56, no. 6. – P. 363–371.

7. Болдырев, П.А. Обзор программных средств в области анализа публикационной активности учёных / П.А. Болдырев, И.Б. Крылов // *XXIII студенческая международная заочная научно-практическая конференция «Молодёжный научный форум: технические и математические науки»*. – 2015. – <http://nauchforum.ru/ru/node/6914> (дата обращения: 01.10.2020).

8. Квелидзе-Кузнецова, Н.Н. Библиометрические показатели как оценочный критерий деятельности преподавателя университета / Н.Н. Квелидзе-Кузнецова, С.А. Морозова // *Universum: Вестник Герценовского университета*. – 2009. – № 4. – С. 38–45.

9. Москалева, О.В. Потери публикаций России: почему и как избежать? / О.В. Москалева // *4-я Международная научно-практическая конференция «Научное издание международного уровня – 2015: современные тенденции в мировой практике редактирования, издания и оценки научных публикаций»*. – 2015. – С. 87–91.

Краткие сообщения

10. Полянин, А.Д. Об индексе Хирша и других наукометрических показателях / А.Д. Полянин // *Научное сообщество*. – 2013. – № 8–9. – С. 20–22.

11. Штовба, С.Д. Обзор наукометрических показателей для оценки публикационной активности учёного / С.Д. Штовба, Е.В. Штовба // *Управление большими системами. Специальный выпуск 44: «Наукометрия и экспертиза в управлении наукой»*. – 2013. – С. 262–278.

12. Холодов, А.С. Об индексах цитирования научных работ / А.С. Холодов // *Вестник Российской академии наук*. – 2015. – Т. 85, № 4. – С. 310–320.

13. Garcia-Perez, M.A. The Hirsch *h* index in a nonmainstream area: methodology of the behavioral sciences in Spain / M.A. Garcia-Perez // *The Spanish Journal of Psychology*. – 2009. – Vol. 12, no. 2. – P. 833–849.

14. Egghe, L. Mathematical theory of the *h*- and *g*-index in case of fractional counting of authorship / L. Egghe // *Journal of the American Society for Information Science and Technology*. – 2008. – Vol. 59, no. 10. – P. 1608–1616.

15. Krylov, I.B. Several characteristics of existing automated systems according to survey of russian scientists publishing activity / I.B. Krylov, P.A. Boldyrev // *Theoretical & Applied Science*. – 2015. – no. 5 (25). – P. 6–9.

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

Иванова (Луговскова) Юлия Петровна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; ulia_lugovskova@inbox.ru.

Анциферова Лариса Михайловна, канд. пед. наук, доцент кафедры прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; antsiferova_68@mail.ru.

Блинов Владислав Дмитриевич, студент, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; blnvldslv@gmail.com.

Поступила в редакцию 5 октября 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr200413

DEVELOPMENT OF A MODIFIED WINNOWING METHOD FOR AGGREGATING BIBLIOGRAPHIC INFORMATION DATA FROM CITATION SYSTEMS UNDER THE CONDITIONS OF INCOMPLETE INFORMATION

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

Yu.P. Ivanova (Lugovskova), ulia_lugovskova@inbox.ru,

L.M. Antsiferova, antsiferova_68@mail.ru,

V.D. Blinov, blnvldslv@gmail.com

Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

Currently, transition to the electronic presentation of bibliographic information about scientific works has caused an increased interest in scientometric research. At the same time, the existing scientometric methods are criticized by scientists, since the incomplete bibliographic base and tools for its assessment do not allow the most accurate assessment of the contribution of scientific work. The problem of the quality of scientometric assessments, as a rule, is based on the study of the data of a certain citation system, which does not include complete information about all publications of the authors contained in other citation systems. **Aim.** This study is aimed at developing an adaptive

approach for the formation of aggregated data of bibliographic information of a scientific organization in conditions of incomplete information from the citation systems of the RSCI, “Google Academy” and Scopus. **Methods.** The definition of the aggregated list of publications for the analysis of scientometric indicators was carried out by the Winnowing method, the Levenshtein algorithm, the shingle method and the Jaro–Winkler method. In the framework of the experimental study, the effectiveness of the application of the considered methods for aggregating information from citation systems was assessed based on the analysis of accuracy, completeness and F-measure. **Results.** Experiments on test data from the list of publications by authors of the Orenburg State University from the citation systems RSCI, Google Academy and Scopus showed that the Winnowing method formed the most accurate lists of publications by the F-measure criterion. To improve the performance of this algorithm, a two-stage optimization of the aggregation process was carried out, which made it possible to improve the running time of the algorithm when generating a list of bibliographic descriptions. **Conclusion.** The proposed approach for the formation of aggregated data of bibliographic information of a scientific organization in conditions of incomplete information from the citation systems of the Russian Science Citation Index, Google Academy and Scopus allows increasing productivity in the formation of a list of authors' publications and shows good efficiency in determining the scientometric characteristics of authors.

Keywords: citation system; scientometric methods; aggregation of bibliographic information; modification of the Winnowing method; Levenshtein method, shingle method.

References

1. Yang K., Meho L.I. Citation Analysis: A Comparison of Google Scholar, Scopus, and Web of Science. *Proceedings of the American Society for Information Science and Technology*, 2006, vol. 43, no. 1, pp. 1–15.
2. Chowdhury A., Frieder O., Grossman D., McCabe C. Collection Statistics for Fast Duplicate Document Detection. *ACM Trans. Inform. Syst.*, 2002, vol. 20, no. 2, pp. 171–191.
3. Kotsemir M.N. Publication Activity of Russian Researches in Leading International Scientific Journals. *Acta Naturae*, 2012, vol. 4, no. 2 (13), pp. 15–35.
4. Mazov N.A., Gureev V.N. [Programs for Scientometric and Bibliometric Research: An Overview and Comparative Analysis]. *Trudy 15-j Vserossijskoj nauchnoj konferencii “Jelektronnye biblioteki: perspektivnye metody i tehnologii, jelektronnye kollekcii”* [Proceedings of the 15th All-Russian Scientific Conference “Digital Libraries: Advanced Methods and Technologies, Digital Collections”], 2013, pp. 23–28. (in Russ.)
5. Kosinov D.I. [Use of Statistical Information to Identify Similar Documents]. *Sbornik “Internet-matematika”* [Collection “Internet Mathematics”], 2007, pp. 84–90. (in Russ.)
6. Baneyx A. “Publish or Perish” as Citation Metrics Used to Analyze Scientific Output in the Humanities: International Case Studies in Economics, Geography, Social Sciences, Philosophy, and History. *Archivum Immunologiae et Therapiae Experimentalis*, 2008, vol. 56, no. 6, pp. 363–371.
7. Boldyrev P.A., Krylov I.B. *Obzor programmnykh sredstv v oblasti analiza publikatsionnoj aktivnosti uchenykh* [Review of Software Tools in the Field of Analysis of the Publication Activity of Scientists]. Available at: <http://nauchforum.ru/ru/node/6914> (accessed 01.10.2020).
8. Kvelidze-Kuznetsova N.N., Morozova S.A. [Bibliometric Indicators as an Evaluation Criterion of the Teacher's Activity University]. *Universum: Bulletin of Herzen University*, 2009, no. 3, pp. 38–45. (in Russ.)
9. Moskaleva O.V. [Losses of Russian Publications: Why and How to Avoid it?]. *4-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya “Nauchnoe izdanie mezhdunarodnogo urovnya – 2015: sovremennye tendentsii v mirovoy praktike redaktirovaniya, izdaniya i otsenki nauchnykh publikatsiy” (26–29 maya 2015 g., Sankt-Peterburg)* [4th International Scientific and Practical Conference “Scientific publication of the international level – 2015: current trends in world practice of editing, publishing and evaluating scientific publications” (May 26–29, 2015, St. Petersburg)], 2015, pp. 87–91. (in Russ.)
10. Polyanin A.D. [About the Hirsch Index and Other Scientometric Indicators] *Nauchnoe soobshchestvo* [Science community], 2013, no. 8–9, pp. 20–22. (in Russ.)
11. Shtovba S.D. [Review of Scientometric Indicators for Assessing the Publication Activity of a Scientist] *Upravlenie bol'shimi sistemami. Spetsial'nyy vypusk 44: “Naukometriya i ekspertiza v uprav-*

Краткие сообщения

lenii naukoy” [Management of Large Systems. Special Issue 44: “Scientometrics and Expertise in Science Management”], 2013, pp. 262–278. (in Russ.)

12. Kholodov A.S. [About Citation Indexes of Scientific Works]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2015, no. 4, pp. 310–320. (in Russ.)

13. Garcia-Perez M.A. The Hirsch h-Index in a Nonmainstream Area: Methodology of the Behavioral Sciences in Spain. *The Spanish Journal of Psychology*, 2009, vol. 12, no. 2, pp. 833–849.

14. Egghe L. Mathematical Theory of the h- and g-Index in Case of Fractional Counting of Authorship. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2008, vol. 59, no. 10, pp. 1608–1616.

15. Krylov I.B., Boldyrev P.A. Several Characteristics of Existing Automated Systems According to Survey of Russian Scientists Publishing Activity. *Theoretical & Applied Science*, 2015, no. 5 (25), pp. 6–9.

Received 5 October 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Разработка модифицированного метода Winnowing для агрегирования данных библиографической информации из систем цитирования в условиях неполной информации / И.П. Болодурина, Ю.П. Иванова (Луговскова), Л.М. Анциферова, В.Д. Блинов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 126–134. DOI: 10.14529/ctcr200413

FOR CITATION

Bolodurina I.P., Ivanova (Lugovskova) Yu.P., Antsiferova L.M., Blinov V.D. Development of a Modified Winnowing Method for Aggregating Bibliographic Information Data from Citation Systems under the Conditions of Incomplete Information. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 126–134. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200413

ВЛИЯНИЕ ОРГАНОВ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ВЛАСТИ СУБЪЕКТОВ РФ НА РАЗВИТИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И КОРПОРАЦИЙ

О.В. Логиновский¹, А.С. Халдин¹, А.А. Шинкарев²

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

² ООО «Софтмаст-ИТ», г. Челябинск, Россия

Введение. Показано, что в связи с происходящими в мире финансово-экономическими кризисами, а также резким обострением конкуренции на международных рынках промышленной продукции и целым рядом других факторов вопросы повышения эффективности деятельности промышленных предприятий и корпораций в регионах страны нуждаются в более комплексном и всесторонне продуманном обосновании. **Цель исследования.** Целесообразно разработать комплекс научных положений и рекомендаций по анализу деятельности промышленных предприятий в регионах, который бы способствовал целенаправленному развитию экономики субъектов РФ в современных условиях ведения бизнеса. **Материалы и методы.** Используемые материалы и методы очерчены содержанием теоретических разработок и практического опыта, полученных в процессе исследования развития экономики и промышленности регионов Российской Федерации. **Результаты.** Обоснован перечень научных положений и рекомендаций по повышению эффективности влияния органов государственной власти субъектов Российской Федерации на развитие промышленности и экономики регионов страны. Представлен состав методов государственного регулирования в экономике и промышленности регионов, представлен перечень основных задач промышленно-экономического блока для органов государственной власти субъектов РФ, а также функции и механизмы их реализации. **Заключение.** Развитие экономики и промышленности регионов России следует осуществлять с использованием научных положений и рекомендаций, представленных в данной статье, что позволит при формировании управленческих решений учесть зачастую неиспользуемые ранее факторы и обоснования.

Ключевые слова: промышленные предприятия и корпорации, промышленность и экономика региона, методы, показатели, факторы, органы государственной власти субъектов РФ.

Введение

Последние 15 лет прошлого века в нашей стране, осуществившей переход от социализма к капитализму, наглядно показали, что желания руководителей государства того периода сделать Россию одной из крупнейших промышленно развитых стран планеты осуществить так и не удалось. Программы интенсификации, ускорения, перестройки народного хозяйства, а затем приватизации промышленных предприятий привели к тому, что к концу прошлого века российская промышленность оказалась во многом разграбленной и оскудевшей, а валовый национальный продукт упал до недопустимо низкого уровня. В то же время по удельному весу в мировом валовом продукте Советский Союз занимал второе место после США, РСФСР – третье.

В начале XXI века новым Президентом Российской Федерации В.В. Путиным были приняты весьма энергичные и совершенно необходимые меры для упорядочения ситуации во всех областях народного хозяйства страны и прежде всего в промышленности. Однако мировые финансовые кризисы прошлого и нынешнего десятилетий, а также усилие стран Запада по развалу экономики нашей страны наряду с факторами резкого увеличения глобальной нестабильности не дали возможности обеспечить рост экономики в России и ее выход на лидирующие позиции в мире. Именно эти и другие факторы всемирной динамики не позволяют и сегодня обеспечить так необходимый нашей стране экономический рывок и прорыв в технологическом развитии.

С позиции сегодняшнего дня становится все более ясным, что крупнейшие мировые державы вступили в эпоху жесткого противостояния за владение ресурсами, территориями, технологиями и воздействием на информационное пространство планеты. Разумеется, что особая роль в этом

противостоянии будет принадлежать и промышленно-технологическому развитию крупнейших стран и экономических регионов, находящихся под влиянием последних.

В этих условиях весьма важно понять, какие средства, методы и управленческие механизмы смогут стать наиболее эффективными в борьбе за мировое лидерство и позволят нашей стране не только не отстать, но и опередить западных и восточных конкурентов.

Отметим, что методы управления промышленностью, используемые в Советском Союзе, несмотря на их сокрушительную критику, а затем и полное разрушение в 1990-х годах, тем не менее позволяли нашему государству успешно противостоять экономической мощи стран Запада.

Сегодня же отечественные промышленные предприятия и корпорации во многом «отбились от рук». Их чрезмерная самостоятельность часто приводит к тому, что их корпоративные интересы перестают соответствовать государственным интересам развития России, и руководству страны приходится прикладывать иногда весьма значительные и не всегда экономически обоснованные усилия для того, чтобы российский бизнес осуществлял свое развитие с учетом национальных интересов.

Сложившаяся ситуация в мире ставит перед руководством России и ее регионами вопрос о необходимости повышения влияния органов государственной власти на деятельность всех сфер экономики страны и ее «сердца» – оборонно-промышленного комплекса.

По теме управления развитием экономики и промышленности имеется весьма значительное количество публикаций. Отметим некоторые из них, причем как отечественных [2–16, 18–21, 23–25, 27–29], так и зарубежных авторов [1, 17, 22, 26].

Всесторонний анализ исследований в области управления экономикой и промышленностью регионов позволил констатировать, что современные отечественные промышленные предприятия и корпорации осуществляют свою деятельность в основном по собственному разумению, мало обращая внимания на интересы страны, регионов и городов даже в том случае, если они дислоцируются на их территориях. Имеющиеся концепции социально-экономического развития регионов, их промышленной и обеспечивающей инфраструктуры зачастую не содержат обоснованных мер по их эффективному развитию [14].

В результате деятельность многих отечественных промышленных предприятий и корпораций приводит к тому, что их собственники не только выводят свои капиталы за рубеж, но и под разными предлогами передают несоразмерно большую часть собственности своих компаний зарубежным владельцам. Все эти и многие другие факторы снижают эффективность системы регионального управления и отнюдь не способствуют подъему промышленности в регионах и обеспечению экономического роста.

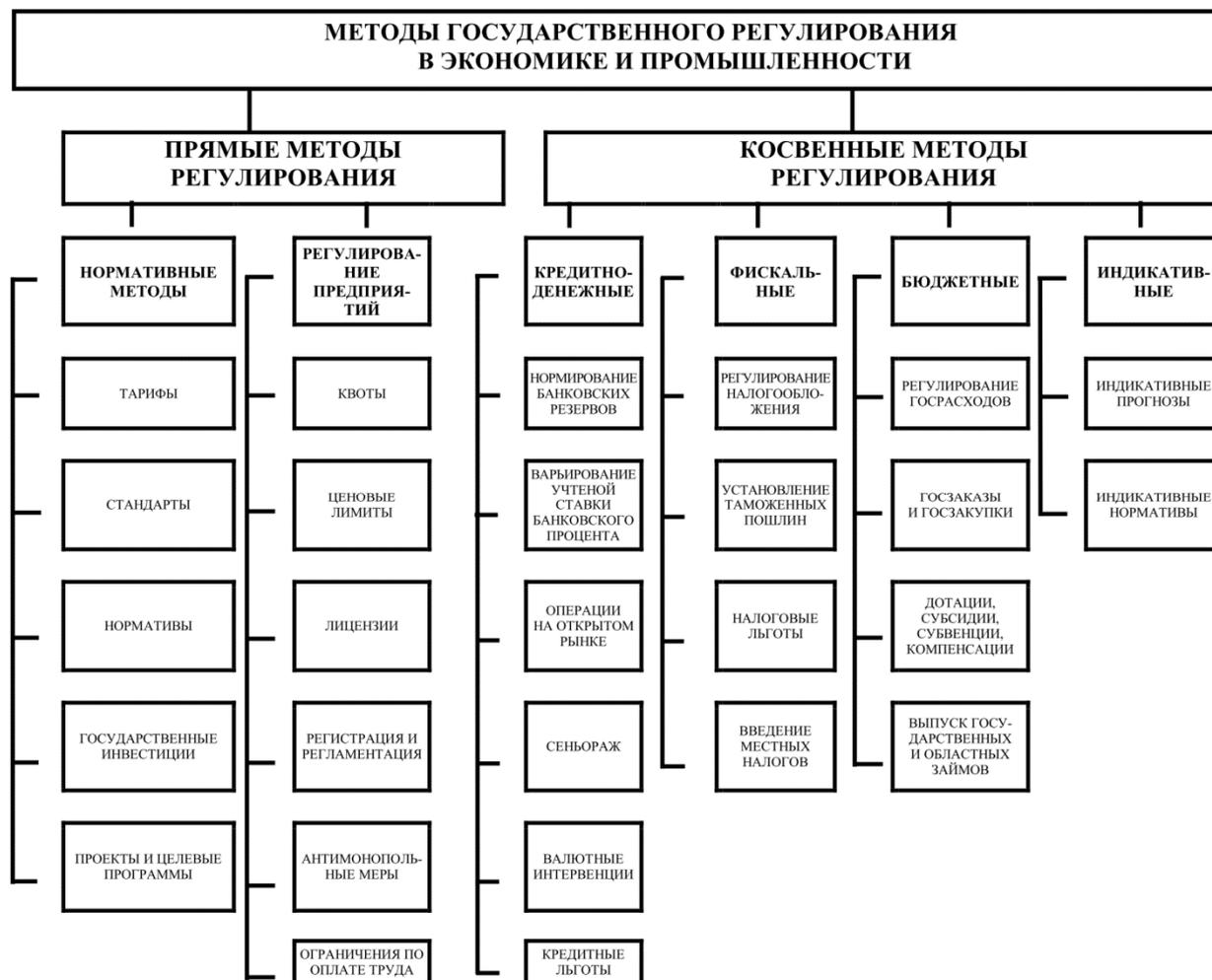
Материалы комплексного анализа положений и рекомендаций о преобразованиях в управлении промышленностью и социально-экономическим развитием страны и ее регионов можно найти в монографии [14].

1. Основные задачи и методы повышения эффективности управления промышленными предприятиями и корпорациями в регионах страны

Наиболее важной задачей развития промышленности и экономики в регионах является анализ состояния и перспективной динамики базовых отраслей промышленности в субъекте РФ, а также координация инвестирования пилотных проектов для предприятий региона в сочетании с активной межрегиональной и внешнеэкономической деятельностью.

Существующие методы повышения эффективности управления промышленностью в РФ и ее субъектах в современной российской практике государственного управления промышленностью и экономикой отражены на рисунке. Часть из них относится к правовому регулированию, которое состоит в установлении органами государственной власти субъектов РФ своего рода «правил игры на экономическом поле» для промышленных предприятий, в том числе норм и прав собственности, условий заключения контрактов, взаимных обязательств по трудовым отношениям профсоюзов, работодателей и региональных органов государственной власти и т. п. [14].

Другая часть связана с административным регулированием, использующим различные меры по лицензированию, квотированию, контингентированию, с помощью которых путем закрепления, разрешения или запрещения, принуждения осуществляется управление и контроль над ценами, доходами, учетной ставкой и др.



Методы государственного регулирования в экономике и промышленности
Methods of state regulation in the economy and industry

Экономическое регулирование в свою очередь включает воздействия на характер рыночных связей, расширение рынков поставки готовой продукции или приобретения сырья, материалов и полуфабрикатов и т. п. за счет государственного влияния на факторы экономического роста, структуру промышленности, совокупный спрос и предложение, концентрацию капиталов и пр. Для этих целей используются методы бюджетно-налоговой, фискальной и денежно-кредитной политики, а также государственного планирования и программирования в рамках кратко-, средне- и долгосрочных программ обычного, целевого, общенационального и чрезвычайного назначения.

В составе методов прямого государственного регулирования необходимо выделить формы безвозвратного целевого финансирования секторов экономики, отдельных территорий, конкретных промышленных предприятий в виде субвенций или субсидий, включающих дотации, пособия, доплаты из специальных бюджетных и внебюджетных фондов, а также льготных кредитов.

Непосредственное воздействие на состояние промпредприятий осуществляется также посредством инвестиций в отрасли промышленности и конкретные предприятия. Отрасли и отдельные промпредприятия могут стать объектами государственного субсидирования в соответствии с решением государственных органов власти о включении их в программы поддержки образования, здравоохранения, охраны окружающей среды и др.

В число методов прямого воздействия входят: освобождение от уплаты экспортных пошлин, льготное кредитование экспорта, предоставление государственных гарантий под внешние кредиты. Одним из весьма эффективных средств поддержки промпредприятий является региональный государственный заказ на выпускаемую ими промышленную продукцию.

Некоторые методы регулирования выходят за пределы компетенции региональных органов и являются прерогативой центральных органов государственной власти субъектов РФ.

Как видно из рисунка, методы, средства, способы, рычаги, инструменты или механизмы государственного регулирования экономикой и промышленностью на уровне субъектов РФ весьма разнообразны и воздействуют на многие стороны деятельности объектов производства промышленной продукции в регионе и коммерческие организации.

В этом контексте очень важно понимать, что если органы государственной власти субъекта РФ сами еще во многом не сменили сложившейся еще при социализме системы управления и не имеют четкой программы действий по оздоровлению промышленных предприятий региона, то использование указанных методов и рычагов воздействия на промпредприятия может не столько способствовать развитию промышленности, сколько тормозить этот процесс. И сделано это, может быть, совсем непредумышленно, а просто из некомпетентности и отсутствия грамотно разработанной, обоснованной стратегии развития промышленности в субъекте РФ. В этой связи в состав задач, которые должны решать региональные органы власти, а также технологии и механизмы целесообразно внести необходимые коррективы, связанные с использованием средств, которые органы государственной власти должны применять в целях совершенствования собственной структуры, разработки собственной промышленной стратегии, а также собственной региональной системы управления промышленностью и экономикой, включающей современные технологии подготовки принятия решений, эффективные модели управления, а также автоматизированные информационные системы управления развитием промышленности в регионе [14].

2. Основные задачи промышленно-экономического блока субъекта РФ и механизмы их реализации

Основные задачи промышленно-экономического блока для органов государственной власти субъекта РФ, а также функции и механизмы их реализации можно представить в следующем виде:

1. Анализ состояния и прогноз развития промышленности и экономики субъекта РФ.
2. Стратегическое планирование, разработка концепций и программ промышленной и социально-экономической политики.
3. Формирование системы межрегиональных и внешнеэкономических приоритетов на уровне субъекта РФ.
4. Разработка системы финансово-экономических условий, определяющих основные принципы, технологии и другие ограничения для всех субъектов промышленности и экономики региона.
5. Оперативное регулирование, координация деятельности предприятий, ассоциаций и объединений.
6. Финансово-экономическое оздоровление промышленных предприятий.
7. Осуществление скоординированной ценовой и тарифной политики.
8. Повышение эффективности управления государственной собственностью.
9. Рациональное использование ресурсного комплекса субъекта РФ.
10. Создание системы информационно-аналитического обеспечения стратегического управления промышленностью и экономикой региона.

Совершенно очевидно, что перечисленные задачи решаются органами государственной власти субъекта РФ не в полной мере, как и другие задачи, связанные с необходимостью повышения эффективности деятельности промышленных предприятий и корпораций региона.

Следует отметить, что создание современной системы управления в субъектах РФ сдерживается следующими обстоятельствами:

– отсутствием действенных механизмов государственного управления, которые позволили бы обеспечить решение основных социально-политических и производственно-экономических задач в РФ и перейти от благих пожеланий по повышению управляемости в реальном секторе экономики к действительному регулированию экономикой страны и, прежде всего, промышленным производством;

– несогласованностью и даже противоречивостью политических и экономических интересов центра и регионов РФ, ориентацией региональных лидеров на разные экономические платформы, олигархические структуры, политические партии, движения и т. п.;

– отсутствием сегодня, по большому счету, устойчивых межрегиональных экономических связей и обоснованных концепций социально-экономического развития субъектов РФ, а также системы организационного и информационного взаимодействия между всеми участниками производственного и управленческого конвейера;

– сложностью условий экономической деятельности промышленных предприятий, характеризующихся неблагоприятным для их нормальной работы действующим законодательством, зачастую невыгодными для экономики регионов сложившимися кооперационными связями, практически полным отсутствием у промышленных предприятий оборотных средств;

– независимостью выбора стратегических целей и тактических задач управления приватизированными предприятиями от исполнительных органов государственной власти субъектов РФ (за исключением тех предприятий, где контрольный пакет акций принадлежит региональной администрации) и даже от интересов собственных производственных коллективов.

В подобных условиях руководители многих промпредприятий субъектов РФ отнюдь не заинтересованы действовать в интересах населения, собственных работников, а уж тем более рекомендаций областных органов государственной власти.

Тем не менее подходы, направления и средства реализации программы развития промышленности и экономики субъектов РФ должны базироваться на использовании следующих механизмов:

– стратегического планирования и оперативного регулирования промышленностью и экономикой области;

– развития внутриобластной кооперации, выгодной для экономики региона;

– формирования гибкой, сбалансированной тарифной и ценовой политики в сфере промышленного производства, направленной на повышение конкурентоспособности продукции предприятий субъекта РФ на отечественном и мировом рынках;

– развития региональной базы сырьевых ресурсов с учетом имеющихся производственных мощностей и потребностей рынка;

– реструктуризации и финансового оздоровления промышленных предприятий с использованием для этих целей всех имеющихся в распоряжении органов государственной власти региона рычагов (банкротства, внешнего управления, управления государственной собственностью, установлением льгот, запретов и т. п.);

– расширения источников повышения доходности бюджета субъекта РФ;

– развития межрегиональных производственных отношений, подготовки картельных соглашений, использования маркетинговых исследований;

– повышения эффективности тарифных органов субъекта РФ;

– совершенствования инвестиционной и инновационной политики (включая систему управления проектами);

– поиска стратегических партнеров и формирования системы геополитических интересов региона;

– формирования информационно-аналитической основы подготовки и принятия управленческих решений органов государственной власти субъекта РФ, создаваемой в рамках региональной автоматизированной информационной системы управления.

Заключение

Проведенные исследования показали, что развитие промышленных предприятий и корпораций в субъектах РФ не должно осуществляться бессистемно, хаотически, когда органы государственной власти региона и страны недостаточно влияют на их производственно-техническую динамику.

Представленные в данной статье научные положения и рекомендации могут быть использованы руководителями органов государственной власти субъектов РФ, а также промышленных предприятий и корпораций, расположенных на территории последних, для комплексного анализа работы промышленности региона и формирования обоснованных перспектив по модернизации производств, однозначно способных обеспечить существенный экономический рост экономики субъекта РФ.

Литература

1. Аакер, Д. Стратегическое рыночное управление: пер. с англ. / Д. Аакер. – СПб: Питер, 2002. – 544 с.
2. Абалкин, Л.И. Экономическая стратегия для России: проблема выбора / Л.И. Абалкин. – М.: ИЭ РАН, 2007. – 148 с.
3. Бурков, В.Н. Введение в теорию управления организационными системами / В.Н. Бурков, Н.А. Коргин, Д.А. Новиков; под ред. Д.А. Новикова. – М.: Книжный дом «Либроком», 2009. – 264 с.
4. Бурков, В.Н. Механизмы управления: Управление организацией: планирование, организация, стимулирование, контроль: учеб. пособие / В.Н. Бурков, И.В. Буркова, М.В. Губко; под ред. Д.А. Новикова. – М.: Ленанд, 2013. – 216 с.
5. Ведута, Е.Н. Стратегия и экономическая политика государства / Е.Н. Ведута. – М.: Академический Проект, 2004. – 456 с.
6. Гайдар, Е.Т. Долгое время. Россия в мире: очерки экономической истории / Е.Т. Гайдар. – М.: Дело, 2005. – 656 с.
7. Гапоненко, А.Л. Стратегия социально-экономического развития: страна, регион, город / А.Л. Гапоненко. – М.: Омега. – 2012. – 327 с.
8. Глазьев, С.Ю. Развитие российской экономики в условиях глобальных технологических сдвигов: науч. докл. / С.Ю. Глазьев. – М.: НИР, 2007. – 134 с.
9. Забелин, П.В. Основы стратегического управления / П.В. Забелин, Н.К. Моисеева. – М.: Высшая школа, 2006. – 125 с.
10. Логиновский, О.В. Государственное управление промышленностью в регионах РФ: науч. изд. / О.В. Логиновский, И.П. Болодурина. – М.: Машиностроение, 2003. – 368 с.
11. Логиновский, О.В. Корпоративное управление: науч. изд. / О.В. Логиновский, А.А. Максимов. – М.: Машиностроение, 2007. – Т. 2. – 624 с.
12. 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.
13. Логиновский, О.В. Управление промышленным предприятием: науч. изд. / О.В. Логиновский, А.А. Максимов. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 1. – 603 с.
14. Логиновский, О.В. Управление развитием региона: науч. изд. / О.В. Логиновский, Н.М. Рязанов. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 3. – 560 с.
15. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др.; под ред. О.В. Логиновского. – М.: Инфра-М, 2020. – 450 с. – (Научная мысль).
16. Львов, Д.С. Экономика развития / Д.С. Львов. – М.: Экзамен, 2002. – 512 с.
17. Минцберг, Г. Школы стратегий / Г. Минцберг, Б. Альстрэнд, Дж. Лэмпел. – СПб.: Питер, 2002. – 336 с.
18. Новиков, Д.А. Теория управления организационными системами / Д.А. Новиков. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2012. – 604 с.
19. Стратегический ответ России на вызовы нового века / под общ. ред. Л.И. Абалкина. – М.: Экзамен, 2004. – 608 с.
20. Стратегия и проблемы устойчивого развития России в XXI веке / под ред. А.Г. Гранберга и др. – М.: Экономика, 2002. – 414 с.
21. Сценарий и перспективы развития России / под ред. В.А. Садовниченко и др. – М.: Ленанд, 2011. – 320 с.
22. Томпсон, А.А. Стратегический менеджмент: концепции и ситуации для анализа: пер. с англ. / А.А. Томпсон, А.Дж. Стрикленд. – М.: Вильямс, 2007. – 928 с.
23. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: моногр. / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др.; под ред. О.В. Логиновского, А.А. Максимова. – М.: Инфра-М, 2018. – 410 с. – (Научная мысль).
24. 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.: Экономика, 2002. – 702 с.

25. Уткин, Э.А. Государственное и региональное управление / Э.А. Уткин, А.Ф. Денисов. – М.: ИКФ «Экмос», 2002. – 320 с.
26. Глобальные трансформации: Политика, экономика, культура / Д. Хелд и др.; пер. с англ. В.В. Сапова и др. – М.: Праксис, 2004. – 576 с.
27. *Introduction to theory of control in organizations* / V. Burkov, M. Goubko, N. Korgin, D. Novikov. – Boca Raton, USA: CRC Press, 2015. – 346 с.
28. *Burkov, V.N. Control Mechanisms for Ecological-Economic Systems* / V.N. Burkov, D.A. Novikov, A.V. Shchepkin. – Berlin: Springer, 2015. – 174 p.
29. *Global Economic Instability and Management of Industrial Organisations* / K.A. Korennaya, O.V. Loginovskiy, A.A. Maksimov, A.V. Zimin; Editorship by doctor of science, professor A.L. Shestakov. – Kostanay: Kostanay State University by A. Baitursynov Press. – 230 p.

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; loginovskiiiov@susu.ru.

Халдин Александр Сергеевич, аспирант, инженер-исследователь кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; sanya_74rus@list.ru.

Шинкарев Александр Андреевич, канд. техн. наук, инженер-программист, ООО «Софтмаст-ИТ», г. Челябинск; sania.kill@mail.ru.

Поступила в редакцию 25 июля 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr200414

THE INFLUENCE OF PUBLIC AUTHORITIES OF THE CONSTITUENT ENTITIES OF THE RUSSIAN FEDERATION ON THE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL ENTERPRISES AND CORPORATIONS

O.V. Loginovskiy¹, loginovskiiiov@susu.ru,

A.S. Khaldin¹, sanya_74rus@list.ru,

A.A. Shinkarev², sania.kill@mail.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² Softmast-IT LLC, Chelyabinsk, Russian Federation

Introduction. It is shown that in connection with the ongoing financial and economic crises in the world, as well as a sharp aggravation of competition in the international markets of industrial products and a number of other factors, the issues of increasing the efficiency of industrial enterprises and corporations in the regions of the country need a more comprehensive and comprehensively thought-out justification. **Purpose of the study.** It is advisable to develop a set of scientific provisions and recommendations for the analysis of the activities of industrial enterprises in the regions, which would contribute to the purposeful development of the economy of the constituent entities of the Russian Federation in modern business conditions. **Materials and methods.** The materials and methods used are outlined by the content of theoretical developments and practical experience obtained in the process of researching the development of the economy and industry of the regions of the Russian Federation. **Results.** The list of scientific provisions and recommendations for increasing the effectiveness of the influence of state authorities of the constituent entities of the Russian Federation on the development of industry and economy of the country's regions has been substantiated. The composition of methods of state regulation in the economy and industry of the re-

gions is presented, a list of the main tasks of the industrial and economic block for state authorities of the constituent entities of the Russian Federation, as well as the functions and mechanisms of their implementation, is presented. **Conclusion.** The development of the economy and industry of the regions of Russia should be carried out using the scientific provisions and recommendations presented in this article, which will allow, when forming management decisions, to take into account factors and justifications that were often unused before.

Keywords: industrial enterprises and corporations, industry and economy of the region, methods, indicators, factors, government bodies of the constituent entities of the Russian Federation.

References

1. Aaker D. *Strategicheskoye rynochnoye upravleniye* [Strategic Market Management]. St. Petersburg, Peter, 2002. 544 p.
2. Abalkin L.I. *Ekonomicheskaya strategiya dlya Rossii: problema vybora* [Economic Strategy for Russia: the Problem of Choice]. Moscow, IE RAS, 2007. 148 p.
3. Burkov V.N., Korgin N.A., Novikov D.A. *Vvedeniye v teoriyu upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Introduction to the Theory of Management of Organizational Systems]. Moscow, Book house "Librokom", 2009. 264 p.
4. Burkov V.N., Burkova I.V., Sponge M.V. *Mekhanizmy upravleniya: upravleniye organizatsiy: planirovaniye, organizatsiya, stimulirovaniye, kontrol'* [Management Mechanisms: Organization Management: Planning, Organization, Stimulation, Control]. Moscow, Lenand, 2013. 216 p.
5. Veduta E.N. *Strategiya i ekonomicheskaya politika gosudarstva* [Strategy and Economic Policy of the State]. Moscow, Academic Project, 2004. 456 p.
6. Gaidar E.T. *Dolgoye vremya. Rossiya v mire: ocherki ekonomicheskoy istorii* [For a Long Time. Russia in the World: Essays in Economic History]. Moscow, Delo, 2005. 656 p.
7. Gaponenko A.L. *Strategiya sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya: strana, region, gorod* [Socio-Economic Development Strategy: Country, Region, City]. Moscow, Omega, 2012. 327 p.
8. Glazhev 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.
9. Zabelin P.V., Moiseeva N.K. *Osnovy strategicheskogo upravleniya* [Fundamentals of Strategic Management]. Moscow, Higher school, 2006. 125p.
10. Loginovskiy O.V., Bolodurina I.P. *Gosudarstvennoye upravleniye promyshlennost'yu v regionakh RF* [State Management of Industry in the Regions of the Russian Federation]. Moscow, Mechanical engineering, 2003. 368 p.
11. Loginovsky O.V., Maksimov A.A. *Corporate governance: scientific publication. T.2.* [Corporate Governance: Scientific Publication. Vol. 2]. Moscow, Mechanical Engineering, 2007. 624 p.
12. 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. (in Russ.)
13. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Upravleniye promyshlennym predpriyatiyem: nauchnoye izdaniye. T.1.* [Industrial Enterprise Management: Scientific Publication. Vol. 1]. Moscow, Mechanical engineering, 2006. 603 p.
14. Loginovskiy O.V., Ryazanov N.M. *Upravleniye razvitiyem regiona: nauchnoye izdaniye. T. 3.* [Regional Development Management: Scientific Publication. Vol. 3]. Moscow, Mechanical engineering, 2006. 560 p.
15. 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.
16. Lvov D.S. *Ekonomika razvitiya* [Development Economics]. Moscow, Exam, 2002. 512 p.
17. Mintzberg G., Alstrand B., Lampel J. *Shkoly strategiy* [Schools of Strategies]. St. Petersburg, Peter, 2002. 336 p.
18. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of Management of Organizational Systems]. Moscow, Publishing house of physical and mathematical literature, 2012. 604 p.
19. Abalkin L.I. (Ed.) *Strategicheskiiy otvet Rossii na vyzovy novogo veka* [Russia's Strategic Response to the Challenges of the New Century]. Moscow, Examination, 2004. 608 p.

20. Granberg A.G. *Strategiya i problemy ustoychivogo razvitiya Rossii v XXI veke* [Strategy and Problems of Sustainable Development of Russia in the XXI Century]. Moscow, Ekonomika Publ., 2002. 414 p.
21. Sadovnichy V.A. *Stsenariy i perspektivy razvitiya Rossii* [Scenario and Development Prospects for Russia]. Moscow, Lenand, 2011. 320 p.
22. Thompson A.A., Strickland A.J. *Strategicheskij menedzhment: kontseptsii i situatsii dlya analiza* [Strategic Management: Concepts and Situations for Analysis]. Moscow, Williams, 2007. 928 p.
23. Loginovsky O.V., Maximov A.A., Burkov V.N., Burkova I.V., Gelrud Ya.D., Korennaya K.A., Shestakov A.L. *Upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy* [Management of Industrial Enterprises: Strategies, Mechanisms, Systems]. Moscow, Infra-M, 2018. 410 p.
24. L'vov D.S., Porshnev A.G. *Upravleniye sotsial'no-ekonomicheskim razvitiyem Rossii: kontseptsii, tseli, mekhanizmy* [Management of Social and Economic Development of Russia: Concepts, Goals, Mechanisms]. Moscow, Publishing House of Economics, 2002. 702 p.
25. Utkin E.A., Denisov A.F. *Gosudarstvennoye i regional'noye upravleniye* [State and Regional Management]. Moscow, IKF "Ekmos", 2002. 320 p.
26. Held D. *Global'nyye transformatsii: politika, ekonomika, kul'tura* [Global Transformations: Politics, Economics, Culture]. Moscow, Praxis, 2004. 576 p.
27. Burkov V., Goubko M., Korgin N., Novikov D. *Introduction to Theory of Control in Organizations*. Boca Raton, CRC Press, 2015. 346 p.
28. Burkov V.N., Novikov D.A., Shchepkin A.V. *Control Mechanisms for Ecological-Economic Systems*. Berlin, Springer, 2015. 174 p.
29. 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.

Received 25 July 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Логиновский, О.В. Влияние органов государственной власти субъектов РФ на развитие промышленных предприятий и корпораций / О.В. Логиновский, А.С. Халдин, А.А. Шинкарев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 135–143. DOI: 10.14529/ctcr200414

FOR CITATION

Loginovskiy O.V., Khaldin A.S., Shinkarev A.A. The Influence of Public Authorities of the Constituent Entities of the Russian Federation on the Development of Industrial Enterprises and Corporations. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 135–143. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200414

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИКОЙ РЕГУЛЯЦИИ ГЛИКЕМИИ У БОЛЬНЫХ САХАРНЫМ ДИАБЕТОМ ПЕРВОГО ТИПА

И.П. Болодурина, Ю.П. Иванова (Луговскова), Л.М. Анциферова

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия

Работа посвящена проблеме математического моделирования и поиска оптимального управления динамикой баланса инсулин – глюкоза в крови человека, представленной негладкой системой дифференциальных уравнений с постоянным запаздыванием. **Цель исследования.** Данное исследование направлено на разработку и численное решение задачи оптимального управления гликемическим профилем у больных сахарным диабетом первого типа путем инсулинотерапии, основанного на условиях оптимальности для негладких систем с постоянным запаздыванием в фазовой переменной. **Методы.** Общая методика исследования изучаемой проблемы базируется на математической теории оптимального управления, теории численных методов, теории дифференциальных уравнений с негладкой правой частью и с запаздывающим аргументом. При реализации программного комплекса применены методы объектно-ориентированного проектирования. **Результаты.** В данном исследовании на базе исходной динамической модели, предложенной Н.А. Широковой, построена задача оптимального управления динамикой регуляции гликемии у больных сахарным диабетом первого типа с негладкой правой частью и постоянным запаздыванием в фазовой переменной. На основании полученного для построенной задачи оптимального управления необходимого условия оптимальности разработан алгоритмический и программный инструментарий, с помощью которого получены оптимальные программы, представлена их содержательная интерпретация. **Заключение.** Результаты, полученные на основе программной реализации численных алгоритмов разработанной негладкой задачи оптимального управления балансом инсулин – глюкоза с постоянным запаздыванием в фазовых переменных, позволяют получить данные, которые необходимы при мониторинге ситуации по изменению гликемического профиля, при прогнозировании заболевания сахарным диабетом и выборе эффективного лечения.

Ключевые слова: моделирование, оптимальное управление, сахарный диабет, оптимальные программы компенсации.

Введение

Сахарный диабет первого типа – это метаболическое, аутоиммунное заболевание, характеризующееся неспособностью организма поддерживать уровень глюкозы в крови в целевом интервале по причине разрушения β -клеток поджелудочной железы, отвечающих за секрецию инсулина. Диабет вызывает множество опасных осложнений, избежать которые можно только путем контроля уровня глюкозы в крови человека и его удержания в физиологическом интервале [1].

Наиболее эффективный способ улучшения гликемического профиля и качества жизни больного сахарным диабетом первого типа является использование интенсивной инсулинотерапии, основанной на индивидуальном подборе схемы и доз вводимого инсулина. Поэтому оправдана и актуальна разработка специализированных методов поиска оптимального введения инсулина для поддержания уровня глюкозы в крови человека в целевом интервале, для чего широко используется математическое моделирование [2–9].

Данное исследование посвящено разработке и численному решению задачи оптимального управления влиянием инсулинотерапии на гликемический профиль у больных сахарным диабетом первого типа, основанному на условиях оптимальности для негладких систем с постоянным запаздыванием в фазовой переменной.

1. Математическая модель изменения динамики инсулин – глюкоза в крови человека

Для изучения наиболее общих закономерностей изменения динамики инсулин – глюкоза в организме человека рассмотрим математическую модель, предложенную Н.А. Широковой [10–12]. Данная модель построена на основе соотношения баланса уровня глюкозы ($G = G(t)$) и концен-

трации инсулина ($I = I(t)$) в крови человека на временном отрезке $t \in [t_0; T]$ и представлена системой нелинейных дифференциальных уравнений, записанных в нормальной форме Коши:

$$\frac{dI}{dt} = \alpha(\Gamma - \Gamma_0)\theta(\Gamma - \Gamma_0) - \beta\Gamma I, \quad (1)$$

$$\frac{d\Gamma}{dt} = \gamma(\Gamma_0 - \Gamma)\theta(\Gamma_0 - \Gamma) - \sigma\Gamma I - \mu(\Gamma - \Gamma_{cr})\theta(\Gamma - \Gamma_{cr}) + S(t)$$

с начальными условиями

$$I(t_0) = I^0, \Gamma(t_0) = \Gamma^0, \quad (2)$$

и фазовыми ограничениями

$$I(t) \geq 0, \Gamma(t) \geq 0, t \in [t_0; T]. \quad (3)$$

Биологический смысл и значения параметров модели (1)–(3) представлены в табл. 1. Параметры определены согласно соотношениям, полученным в [10–12], на основе качественного исследования модели (1)–(3) и уточнены в ходе вычислительных экспериментов по настройке модели на данные обобщенной картины баланса инсулин – глюкоза.

Предположим идеальную модель питания, когда человек, не испытывающий физических нагрузок, ест в строго определенное время три раза в сутки. $S(t) = A \left(e^{-\frac{(t-8)^2}{2D^2}} + 2e^{-\frac{(t-14)^2}{2D^2}} + e^{-\frac{(t-20)^2}{2D^2}} \right)$ – внешний источник поступления глюкозы в течение одних суток. $\theta(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ – функция Хевисайда, определяющая нарушение гладкости системы дифференциальных уравнений (1).

Уровень концентрации глюкозы в крови человека служит основным показателем, определяющим его гликемический профиль и позволяющим диагностировать нарушение углеводного обмена. Путем численного решения системы (1)–(3) на интервале $T = 24$ ч при начальных условиях $I(t_0) = 0, \Gamma(t_0) = 5$, где $t_0 = 0$ и параметрах, представленных в табл. 1, получены графики гликемического профиля при различных значениях параметра α , представленные на рис. 1.

Таблица 1

Значения параметров модели динамики инсулин – глюкоза

Table 1

Values of the parameters of the insulin-glucose dynamics model

Параметр	Смысловая интерпретация	Значение	Размерность
Γ_0	Нормальный уровень глюкозы	≈ 5	ммоль/л
Γ_{cr}	Критический уровень глюкозы, т. е. уровень глюкозы, выше которого происходит вывод ее из организма через почки	≈ 10	ммоль/л
α	Коэффициент, отвечающий за чувствительность к глюкозе	1	1/ч
β	Коэффициент утилизации инсулина глюкозой	2	1/Ед.·ч
γ	Коэффициент, отвечающий за выход глюкозы из печени для поддержания ее нормального уровня	6	1/ч
σ	Коэффициент утилизации глюкозы инсулином	44	1/Ед.·ч
μ	Параметр, отвечающий за вывод глюкозы через почки, если она превышает критический уровень	5	1/ч
D^2	Скорость усвоения пищи или гликемический индекс принимаемой пищи	0,5	ч
A	Среднесуточное потребление глюкозы	31	ммоль/л·ч

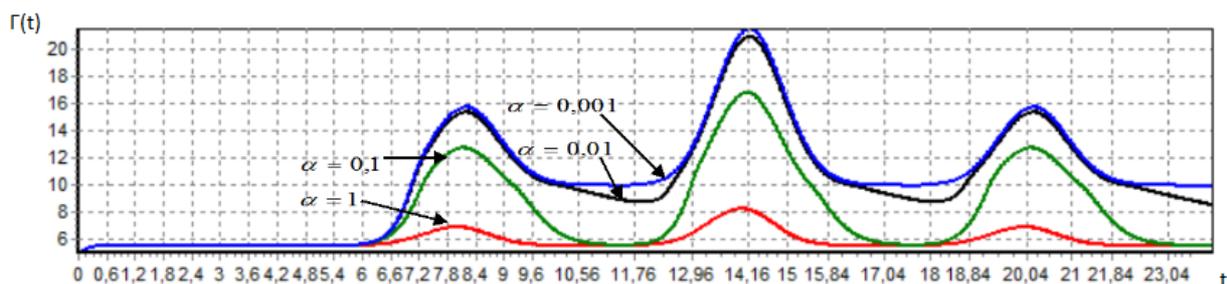


Рис. 1. Гликемический профиль при различных значениях параметра α
Fig. 1. Glycemic profile at different values of the parameter α

Краткие сообщения

Согласно графикам, представленным на рис. 1, уменьшение параметра α , определяющего скорость выработки инсулина, приводит к заболеванию сахарным диабетом 1-го типа. Причем $\alpha = 1$ определяет случай здорового организма, $\alpha = 0,1$ – скрытую форму диабета, $\alpha = 0,01$ и $\alpha = 0,001$ – явную форму диабета, что подтверждают результаты численного моделирования системы (1)–(3), представленные в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Формула Смысловая интерпретация	Случай здорового организма $\alpha = 1$	Скрытая форма диабета $\alpha = 0,1$	Явные формы диабета	
			$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,001$
$\langle \Gamma \rangle = \int_0^{24} \Gamma(t) dt / 24$ – среднесуточный уровень гликемии	5,89	7,94	10,06	10,44
$\langle I \rangle = \int_0^{24} I(t) dt / 24$ – среднесуточная концентрация инсулина	0,029	0,01	0,001	0,0001
$\Delta I = \alpha \int_0^{24} (\Gamma(t) - \Gamma_0) \theta(\Gamma(t) - \Gamma_0) dt \cdot V$, $V = 5$ – общий произведенный инсулин за сутки	48,33	29,4	5,47	0,59
$\Delta \Gamma = \mu \int_0^{24} (\Gamma(t) - \Gamma_{cr}) \theta(\Gamma(t) - \Gamma_{cr}) dt \cdot V / 5,5$, $V = 5$ – количество глюкозы, выведенной через почки за сутки	0	75,6	168,74	187,01

2. Построение управляемой модели лечения сахарного диабета первого типа

Для разработки оптимальных методов стабилизации концентрации глюкозы в крови человека больного сахарным диабетом первого типа в пределах ее нормального уровня на базе исходной динамической модели (1)–(3), предложенной Н.А. Широковой [10–12], путем введения искусственного инсулина и расширения пространства фазовых переменных за счет учета концентрации искусственного инсулина в крови человека ($K = K(t)$), построена управляемая модель баланса инсулин ($I = I(t)$) – глюкоза ($\Gamma = \Gamma(t)$), представленная нелинейной системой дифференциальных уравнений с негладкой правой частью и запаздывающим аргументом:

$$\frac{dI}{dt} = \alpha(\Gamma - \Gamma_0)\theta(\Gamma - \Gamma_0) - \beta I, \quad (4)$$

$$\frac{d\Gamma}{dt} = \gamma(\Gamma_0 - \Gamma)\theta(\Gamma_0 - \Gamma) - \sigma I - \sigma_1 \Gamma K(t - \tau) - \mu(\Gamma - \Gamma_{cr})\theta(\Gamma - \Gamma_{cr}) + S(t),$$

$$\frac{dK}{dt} = (1 - \alpha)u\theta(\Gamma - \Gamma_0) - \beta_1 \Gamma K$$

с начальными условиями

$$t \in [-\tau, 0], I(t) = I^0, \Gamma(t) = \Gamma^0, K(t) = K^0 \quad (5)$$

и фазовыми ограничениями

$$I(t) \geq 0, \Gamma(t) \geq 0, K(t) \geq 0, t \in [t_0; T]. \quad (6)$$

Функция $u = u(t)$ описывает поступление искусственного инсулина извне и удовлетворяет ограничению, учитывающему физиологически допустимую дозу вводимого инсулина

$$0 \leq u(t) \leq B, t \in [t_0; T], \quad (7)$$

где максимальная доза вводимого инсулина B определяется длительностью заболевания, весом и уровнем глюкозы в крови и имеет вид, представленный в [13].

В модели (4) параметр α – весовой коэффициент, характеризующий степень влияния естественного и искусственного инсулина и определяющий форму диабета ($\alpha = 1$ определяет случай здорового организма, $\alpha = 0,1$ – скрытую форму диабета, $\alpha = 0,01$ и $\alpha = 0,001$ – явную форму диабета.); τ – временная задержка начала действия инсулина с момента введения, определяющая тип вводимого инсулина.

3. Выбор критерия качества в модели управления метаболизмом при сахарном диабете первого типа и постановка задачи оптимального управления

Цель инсулинотерапии заключается в том, чтобы копировать естественную реакцию человеческого организма на изменение уровня глюкозы в крови и вводить инсулин в организм в нужные моменты в необходимых количествах. В качестве критериев оптимизации, выражающих цель управления динамикой сахарного диабета первого типа, могут быть использованы различные показатели, направленные, например, на стабилизацию уровня сахара в крови человека; уменьшение доз вводимого инсулина, с целью экономии государственных средств или избежания побочных действий инсулина, способствующего развитию метаболического синдрома и прогрессирования ряда заболеваний; наибо́льшее достижение заданного допустимого показателя сахара после приема пищи и другие критерии.

Гликемический профиль у больных сахарным диабетом первого типа определяется динамикой концентрации глюкозы $\Gamma = \Gamma(t)$ в крови человека. Для исследования закономерностей динамики инсулин – глюкоза в крови человека предположим, что среди допустимых вариантов управления реализуются те, которые обеспечивают близость $\Gamma = \Gamma(t)$ к опорному решению Γ_0 , соответствующему поддержанию нормального уровня глюкозы.

Тогда в рамках построенной управляемой модели (4)–(7) выбор оптимального управления рассмотрим как задачу минимизации функционала

$$I(u) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^T (\Gamma(t) - \Gamma_0)^2 dt} \rightarrow \min. \quad (8)$$

Минимизация функционала (8) позволяет подобрать инсулинотерапию, стабилизирующую уровень сахара в крови человека в пределах показателей нормы Γ_0 .

Таким образом, задача оптимального управления динамикой сахарного диабета первого типа определяется системой нелинейных дифференциальных уравнений с негладкой правой частью и постоянным запаздыванием в фазовых переменных, записанной в нормальной форме Коши вида (4), с начальными условиями (5), фазовыми ограничениями (6), где функция $u = u(t)$ описывает поступление искусственного инсулина извне в единицу времени удовлетворяет ограничению (7). Момент окончания T динамики системы (4) задан. Целью управления является минимизация функционала (8).

Задача оптимального управления состоит в нахождении оптимального управления $u(t)$, $t \in [t_0; T]$, которое минимизирует функционал (8) при ограничениях (4)–(7). Задача (4)–(7) является задачей Лагранжа оптимального управления.

4. Необходимое условие оптимальности и численное решение задачи оптимального управления балансом инсулин – глюкоза при сахарном диабете первого типа, заданной негладкой системой с постоянным запаздыванием в фазовых переменных

В оптимизационной задаче (4)–(8) система дифференциальных уравнений (4) представляет собой систему с негладкой правой частью и с запаздывающим аргументом, общий вид которой

$$\dot{x} = \begin{cases} f_{1i}(t, x(t), x(t - \tau), u(t)), S_i(\Gamma) < 0, \\ f_{2i}(t, x(t), x(t - \tau), u(t)), S_i(\Gamma) \geq 0, \end{cases} \quad (9)$$

где $x = x(t) = (\Gamma(t), I(t), K(t))$ – абсолютно непрерывная на отрезке $[t_0; T]$ вектор-функция состояния; $u = u(t)$ – кусочно-непрерывная на отрезке $[t_0; T]$ функция управления. Поверхность переключения $S(t, x)$ – непрерывно дифференцируемая по совокупности аргументов вектор-функция, имеющая вид $S(t, x) = S(\Gamma) = (\Gamma - \Gamma_0, \Gamma_0 - \Gamma, \Gamma - \Gamma_{cr})$, где $\Gamma_0 = 5$ ммоль/л; $\Gamma_{cr} = 10$ ммоль/л – нормальный и критический уровни глюкозы соответственно. Будем считать $S_1(\Gamma) = \Gamma - \Gamma_0$; $S_2(\Gamma) = \Gamma_0 - \Gamma$; $S_3(\Gamma) = \Gamma - \Gamma_{cr}$. Рассмотрим случай многократного протыкания траекторией $x = x(t) = (\Gamma(t), I(t), K(t))$ поверхностей переключения $S_i(\Gamma)$, $i = \overline{1,3}$ в точках, определенных вектором $\tau_{\alpha i}^k$, $k = \overline{1, n}$, $i = \overline{1,3}$, где $\tau_{\alpha i}^k$, $k = \overline{1, n}$, $i = \overline{1,3}$ – моменты переключения, то есть точки, в которых $S_i(\Gamma(\tau_{\alpha i}^k)) = 0$, $k = \overline{1, n}$, $i = \overline{1,3}$. Функции $f_{1i}(t, x(t), x(t - \tau), u(t))$ и $f_{2i}(t, x(t), x(t - \tau), u(t))$, $i = \overline{1,3}$ в (9) – функции, описывающие правую часть системы дифференциальных уравнений (4) до и после моментов переключения $\tau_{\alpha j}^k$, $k = \overline{1, n}$, $j = \overline{1,2}$, $i = \overline{1,3}$ соответственно.

Краткие сообщения

Для построения оптимального управления применим принцип максимума Понтрягина [14–16]. Так как в задаче имеются фазовые ограничения (6), то обеспечим их выполнение путем введения штрафного слагаемого в функционал (8) и перейдем к постановке задачи, в которой отсутствуют фазовые ограничения, а функционал имеет вид

$$I(u) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^T (\Gamma(t) - \Gamma_0)^2 dt} + A \rightarrow \min, \quad (10)$$

где $A = A_k \int_{t_0}^T [(\max\{-\Gamma, 0\})^2 + (\max\{-I, 0\})^2 + (\max\{-K, 0\})^2] dt$,

$k = 1, 2, \dots, A_k > 0, \lim_{k \rightarrow \infty} A_k = \infty, A_k$ – параметры штрафа.

Функция Понтрягина для задачи (4), (5), (7), (10) имеет вид

$$H(t, x(t), x(t - \tau), u(t), \psi(t), \lambda_0) = \begin{cases} H_{1i}(t, x(t), x(t - \tau), u(t), \psi_{1i}(t), \lambda_0), S_i(\Gamma) < 0, \\ H_{2i}(t, x(t), x(t - \tau), u(t), \psi_{2i}(t), \lambda_0), S_i(\Gamma) \geq 0, \end{cases}$$

где

$$H_{ji}(t, x(t), x(t - \tau), u(t), \psi(t), \lambda_0) = \left(\psi_{ji}, f_{ji}(t, x(t), x(t - \tau), u(t)) \right) - \\ - \lambda_0 \left[\sqrt{\frac{1}{T} (\Gamma(t) - \Gamma_0)^2} + A_k (\max\{-\Gamma, 0\})^2 + (\max\{-I, 0\})^2 + (\max\{-K, 0\})^2 \right],$$

$j = \overline{1, 2}, i = \overline{1, 3}, k = 1, 2, \dots, A_k > 0, \lim_{k \rightarrow \infty} A_k = \infty, A_k$ – параметры штрафа.

Функции $\psi_{ji}(t): T_{ji} \rightarrow R, j = \overline{1, 2}, i = \overline{1, 3}$ – сопряженные вектор-функции, определенные на промежутках $[t_0; \tau_{\alpha i}^k] = T_{1i}^k, k = \overline{1, n}, i = \overline{1, 3}$ и на промежутках $[\tau_{\alpha i}^k; T] = T_{2i}^k, k = \overline{1, n}, i = \overline{1, 3}$ непрерывны и почти всюду непрерывно дифференцируемы на этих отрезках.

Обозначим скалярные функции $H_{ji}(t) = H_{ji}(t, x(t), x(t - \tau), u(t), \psi(t), \lambda_0), t \in T_{ji}^k, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, 2}, i = \overline{1, 3}$.

Воспользовавшись принципом максимума Понтрягина, сформулируем теорему о необходимых условиях оптимальности для задачи оптимального управления (4), (5), (7), (10) с негладкой правой частью и постоянным запаздыванием [4].

Теорема: Пусть процесс $\bar{w} = (\bar{x}(t), \bar{x}(t - \tau), \bar{u}(t), \tau_{\alpha i}^k), k = \overline{1, n}, i = \overline{1, 3}$, где $\tau_{\alpha i}^k$ – точки протыкания траекторией поверхностей переключения $S_i(\Gamma(\tau_{\alpha i}^k)) = 0, k = \overline{1, n}, i = \overline{1, 3}$, является оптимальным в поставленной задаче (4), (5), (7), (10). Тогда с необходимостью существует множитель $\lambda_0 \geq 0$ и неравные одновременно нулю функции $\psi_{1i}(t)\psi_{2i}(t), i = \overline{1, 3}$ такие, что выполняются следующие условия:

1) оптимальное управление $\bar{u}(t)$ во всех точках непрерывности доставляет максимум функции Понтрягина $H_{ji}(t, \bar{x}(t), \bar{x}(t - \tau), u(t), \psi_{ji}(t), \lambda_0), j = \overline{1, 2}, i = \overline{1, 3}$ по всем $0 \leq u(t) \leq B$, то есть

$$H_{ji}(t, \bar{x}(t), \bar{x}(t - \tau), \bar{u}(t), \psi_{ji}(t), \lambda_0) = \max_{0 \leq u(t) \leq B} H_{ji}(t, \bar{x}(t), \bar{x}(t - \tau), u(t), \psi_{ji}(t), \lambda_0),$$

$j = \overline{1, 2}, i = \overline{1, 3}$;

2) сопряженные вектор-функции $\psi_{ji}(t), j = \overline{1, 2}, i = \overline{1, 3}$ удовлетворяют системе дифференциальных уравнений:

$$\dot{\psi}_{ji}(t) = - \frac{\partial H_{ji}(t, \bar{x}(t), \bar{x}(t - \tau), \bar{u}(t), \psi_{ji}(t), \lambda_0)}{\partial x} - \frac{\partial H_{ji}(t + \tau, \bar{x}(t + \tau), \bar{x}(t), \bar{u}(t + \tau), \psi_{ji}(t + \tau), \lambda_0)}{\partial x},$$

$j = \overline{1, 2}, i = \overline{1, 3}, t \in [t_0; T],$

$\psi_{ji}(t) \equiv 0, j = \overline{1, 2}, i = \overline{1, 3}, t > T;$

3) условие трансверсальности

$\psi_{ji}(T) = 0, j = \overline{1, 2}, i = \overline{1, 3};$

4) условия допустимости (4)–(5);

5) в точках $\tau_{\alpha i}^k, k = \overline{1, n}, i = \overline{1, 3}$ пересечения траекторией поверхности переключения выполняется условие скачка сопряженной вектор-функции:

$$\psi_{1i}(\tau_{\alpha i}^k - 0) = \psi_{2i}(\tau_{\alpha i}^k + 0) + \lambda_i \frac{dS(\Gamma(\tau_{\alpha i}^k))}{d\Gamma}, H_{1i}(\tau_{\alpha i}^k - 0) = H_{2i}(\tau_{\alpha i}^k + 0),$$

$$\lambda_i = \frac{(f_{2i}(\tau_{\alpha i}^k, \bar{x}(\tau_{\alpha i}^k), \bar{x}(\tau_{\alpha i}^k - \tau), \bar{u}(\tau_{\alpha i}^k + 0)) - f_{1i}(\tau_{\alpha i}^k, \bar{x}(\tau_{\alpha i}^k), \bar{x}(\tau_{\alpha i}^k - \tau), \bar{u}(\tau_{\alpha i}^k - 0))) \cdot \psi_{2i}(\tau_{\alpha i}^k)}{\frac{dS(\bar{\Gamma}(\tau_{\alpha i}^k))}{d\Gamma} \cdot f_{1i}(\tau_{\alpha i}^k, \bar{x}(\tau_{\alpha i}^k), \bar{x}(\tau_{\alpha i}^k - \tau), \bar{u}(\tau_{\alpha i}^k - 0))}$$

где λ_i – величины скачка в точках $\tau_{\alpha i}^k, k = \overline{1, n}, i = \overline{1, 3}$.

Так как поверхность переключения $S(t, x) = S(\Gamma) = (\Gamma - \Gamma_0, \Gamma_0 - \Gamma, \Gamma - \Gamma_{cr})$ не зависит от аргумента t , то функция Понтрягина постоянна и не имеет скачков на оптимальном решении.

Так как функция Понтрягина линейна по управлению, то введем функции переключения: $\varphi = (1 - \alpha)\theta(\Gamma - \Gamma_0)\varphi^3$. Из условия максимума функции Понтрягина находим оптимальное

$$\text{управление } \bar{u} = \begin{cases} 0, & \varphi < 0, \\ B, & \varphi > 0, \\ \in [0; B], & \varphi = 0. \end{cases}$$

Таким образом, имеем краевую задачу принципа максимума Понтрягина, замкнутую управлением \bar{u} .

Для решения краевой задачи принципа максимума Понтрягина применен метод множителей Лагранжа, основанный на сведении исходной непрерывной задачи оптимального управления к дискретной задаче. Для реализации численного алгоритма получены условия стационарности функции Лагранжа и условие минимума функции Лагранжа по управлению, которым с необходимостью удовлетворяет оптимальный процесс. Для поиска оптимальных динамических траекторий и оптимального управления программно реализованы алгоритмы, основанные на итерационном методе и методе проекции градиента по управлению, позволяющие получить численные результаты решения поставленной задачи.

5. Оптимальные программы компенсации сахарного диабета первого типа

Путем программной реализации численных алгоритмов решения задачи оптимального управления (4)–(8) на интервале $T = 24$ ч при начальных условиях $I(t_0) = 0, K(t_0) = 0, \Gamma(t_0) = 5$, где $t_0 = 0$, и параметрах, представленных в табл. 1, получены графики гликемического профиля у больных сахарным диабетом первого типа при разных значениях параметра α , соответствующих явной и скрытой форме диабета, представленные на рис. 2–4 и в табл. 3. Решение задачи (4)–(8) получено на основе программной реализации алгоритмов итерационного метода и метода проекции градиента по управлению.

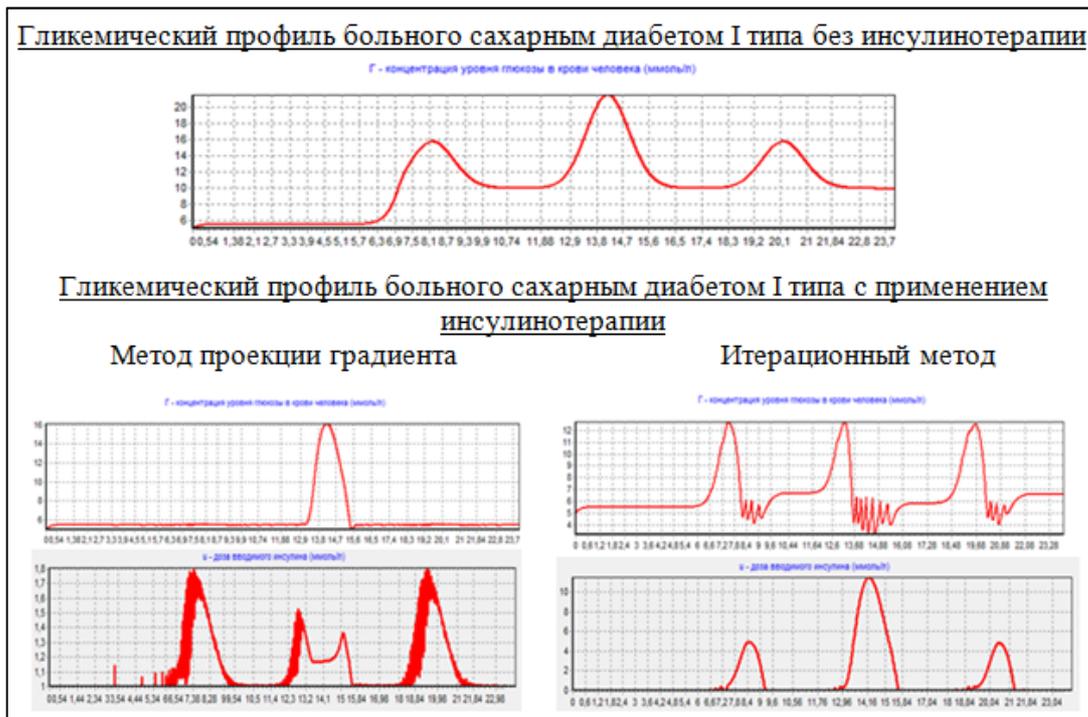


Рис. 2. Гликемический профиль при $\alpha = 0,001$
 Fig. 2. Glycemic profile at $\alpha = 0,001$

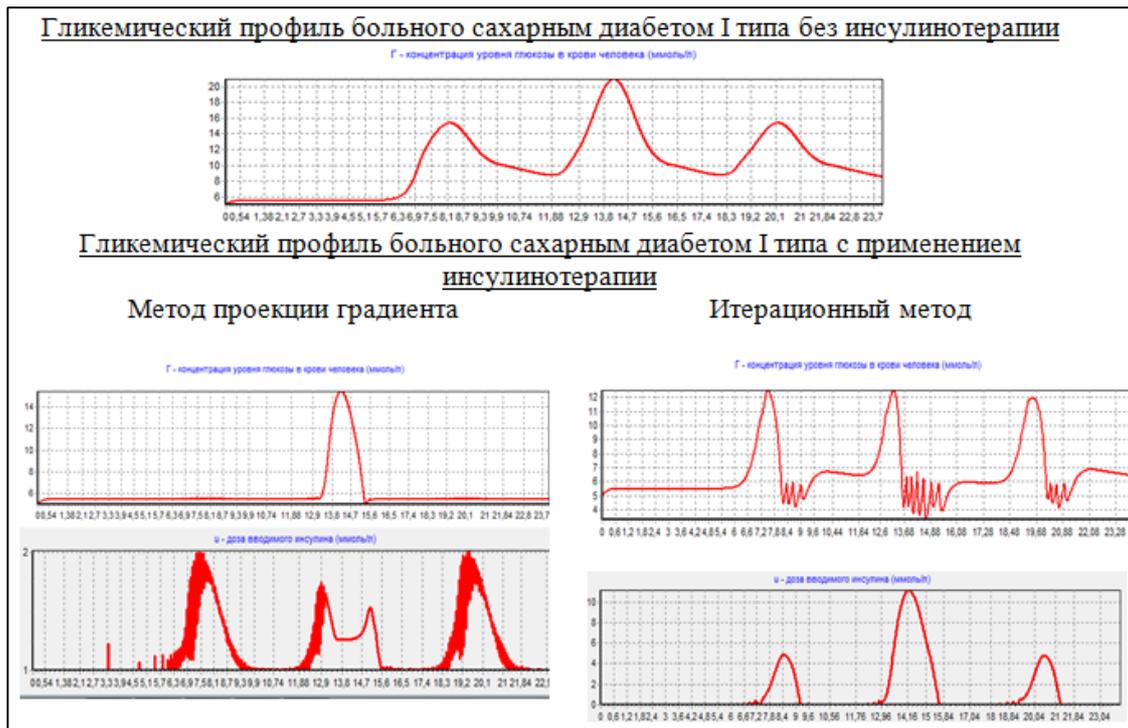


Рис. 3. Гликемический профиль при $\alpha = 0,01$
 Fig. 3. Glycemic profile at $\alpha = 0,01$

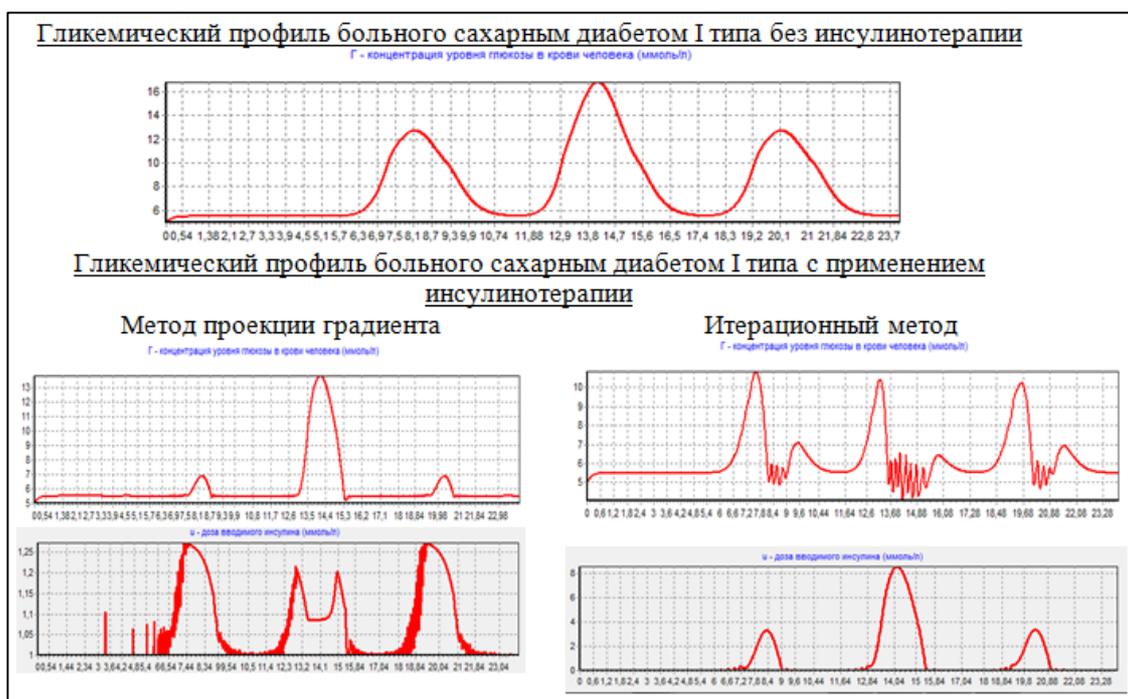


Рис. 4. Гликемический профиль при $\alpha = 0,1$
 Fig. 4. Glycemic profile at $\alpha = 0,1$

Таблица 3

Сравнительные данные программ лечения

Table3

Comparative data of treatment programs

Формула, смысловая интерпретация	Скрытая форма диабета $\alpha = 0,1$		Явная форма диабета $\alpha = 0,01$		Явная форма диабета $\alpha = 0,001$	
$\langle \Gamma \rangle = \int_0^{24} \Gamma(t) dt / 24$ – среднесуточный уровень гликемии	7,94	6,04/ 6,17	10,06	5,9/ 6,5	10,44	6,07/ 6,53
$\langle I \rangle = \int_0^{24} I(t) dt / 24$ – среднесуточная концентрация естественного инсулина	0,01	0,002/ 0,004	0,001	0,0002/ 0,0006	0,0001	0,000022/ 0,000064
$\Delta I = \alpha \int_0^{24} (\Gamma(t) - \Gamma_0) \theta(\Gamma(t) - \Gamma_0) dt \cdot V$, $V = 5$ – общий произведенный инсулин за сутки	29,4	4,8/ 1,57	5,47	0,48	0,59	0,07/ 0,14
$\Delta \Gamma = \mu \int_0^{24} (\Gamma(t) - \Gamma_{cr}) \theta(\Gamma(t) - \Gamma_{cr}) dt \cdot V / 5,5$, $V = 5$ – количество глюкозы, выведенной через почки за сутки	75,6	15,8/ 8,76	168,74	21,899/ 15,35	187,01	27,1/ 18,86
$\Gamma_{\max} = \max\{\Gamma(t), t \in [t_0; T]\}$ – максимальная концентрация глюкозы за сутки	16,75	13,79/ 10,8	20,93	14,9/ 12,3	21,52	16/ 12,6
$\Gamma_{\min} = \min\{\Gamma(t), t \in [t_0; T]\}$ – минимальная концентрация глюкозы с момента приема пищи	5,5	5,47/ 5,5	8,5	5,49/ 6,44	9,9	5,49/ 6,58
$\langle K \rangle = \int_0^{24} K(t) dt / 24$ – среднесуточная концентрация искусственного инсулина	0	0,002/ 0,004	0	0,0002/ 0,0006	0	0,00002/ 0,00006
$I(u) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^T (\Gamma(t) - \Gamma_0)^2 dt}$ – целевой функционал поставленной задачи оптимального управления	12,01	2,68/ 3,29	22,38	2,44/ 4,9	24,23	2,81/ 5,07

Согласно результатам численного моделирования, представленным на рис. 2–4 и табл. 3, управление, отражающее реализацию инсулинотерапии при скрытой и явных формах заболевания сахарным диабетом первого типа, приводит к компенсации сахарного диабета первого типа, снижению максимальной концентрации глюкозы за сутки, снижению среднесуточного уровня гликемии, что является желаемым результатом.

Заключение

С использованием численных методов решения (метод проекции градиентов, итерационный метод) задачи оптимального управления (4)–(8) реализуется подбор корректных доз вводимого инсулина для стабилизации уровня сахара в крови человека в пределах нормального уровня.

Построенные оптимальные программы компенсации сахарного диабета первого типа позволяют создать безопасные устройства для автоматического поддержания заданной концентрации глюкозы в плазме крови, тем самым воплотив идею искусственной поджелудочной железы, функционирующей в замкнутом контуре.

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. Ханас, Р. *Диабет 1 типа у детей, подростков и молодых людей: как стать экспертом в своем диабете* / Р. Ханас. – М.: Арт-Бизнес-Центр, 2011. – 431 с.
2. Древаль, А.В. *Сложная математическая модель сахарного диабета в оценке различных механизмов патогенеза гипергликемии и подбора оптимальной помповой инсулинотерапии* / А.В. Древаль, В.Н. Новосельцев, Е.Л. Оркина // *Автоматика и телемеханика*. – 1982. – № 11. – С. 174–176.
3. *Проверка некоторых гипотез о патогенезе диабета методом математического моделирования* / А.В. Древаль, В.И. Маколкин, В.Н. Новосельцев, Е.Л. Оркина // *Биофизика*. – 1983. – Т. 28, № 5. – С. 866–872.

Краткие сообщения

4. Математическое моделирование системы регуляции гликемии у пациентов с сахарным диабетом / В.А. Карпельев, Ю.И. Филиппов, Ю.В. Тарасов и др. // Вестник РАМН. – 2015. – Т. 70, № 5. – С. 549–560.

5. Лябах Н.Н. Сахарный диабет: Мониторинг, моделирование, управление.– Ростов н/Д., 2004. – 138 с.

6. Теоретическая оценка параметров метаболизма глюкозы на основе данных непрерывного мониторинга гликемии с помощью математического моделирования / А.Н. Свешникова, М.А. Пантелеев, А.В. Древаль и др. // Биофизика. – 2017. – Т. 62, № 5. – С. 1023–1029.

7. Makroglou, A. *Mathematical models and software tools for the glucose-insulin regulatory system and diabetes: an overview* / A. Makroglou, J. Li, Y. Kuang // *Applied Numerical Mathematics*. – 2006. – No. 56. – P. 559–573.

8. Thomas, S.J. *A physiological model of glucose metabolism in man and its use to design and assess improved insulin therapies for diabetes. Thesis (Sc. D.)* / S.J. Thomas. – Boston: MIT, 1985. – 556 p.

9. Markakis, M.G. *Computational study of an augmented minimal model for glycaemia control* / M.G. Markakis, G.D. Mitsis, V.Z. Marmarelis // *Proceedings of the 30-th IEEE EMBS Annual International Conference*. – Canada, 2008. – P. 5445–5448.

10. Широкова, Н.А. Математическое моделирование баланса инсулин-глюкоза в крови и системы регуляции гликемии у пациентов с сахарным диабетом / Н.А. Широкова // *Математические структуры и моделирование*. – 2002. – Вып. 10. – С. 106–115.

11. Широкова, Н.А. Математическое моделирование источников глюкозы и инсулинов в модели баланса «инсулин-глюкоза» / Н.А. Широкова // *Математические структуры и моделирование*. – 2004. – Вып. 14. – С. 47–52.

12. Широкова, Н.А. Математическая модель баланса «глюкоза – инсулин – глюкагон» в крови человека / Н.А. Широкова, И.В. Широков // *Вестник Омского университета*. – 2006. – № 3. – С. 51–53.

13. Кожжеко, Л.Г. Исследование и численная реализация математической модели задачи коррекции уровня сахара в крови / Л.Г. Кожжеко, В.М. Цирулева, И.А. Шаповалова // *Вестник ТвГУ. Серия: Химия*. – 2018. – № 1. – С. 169–178.

14. Андреева, Е.А. Математическое моделирование : учеб. пособие для вузов / Е.А. Андреева, В.М. Цирулева. – Тверь: Тверской государственный университет, 2004. – 502 с.

15. Андреева, Е.А. Вариационное исчисление и методы оптимизации / Е.А. Андреева, В.М. Цирулева. – Тверь: Тверской государственный университет, 2004. – 575 с.

16. Громов, Ю.Ю. Специальные разделы теории управления. Оптимальное управление динамическими системами / Ю.Ю. Громов, О.Г. Иванова, В.В. Алексеев. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 108 с.

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

Иванова (Луговскова) Юлия Петровна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; ulia_lugovskova@inbox.ru.

Анциферова Лариса Михайловна, канд. пед. наук, доцент кафедры прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; antsiferova_68@mail.ru.

Поступила в редакцию 10 сентября 2020 г.

OPTIMAL CONTROL OF GLYCEMIA REGULATION DYNAMICS IN PATIENTS WITH TYPE I DIABETES MELLITUS

I.P. Bolodurina, prmat@mail.osu.ru,
Yu.P. Ivanova (Lugovskova), ulia_lugovskova@inbox.ru,
L.M. Antsiferova, antsiferova_68@mail.ru
Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

The work is devoted to the problem of mathematical modeling and search for optimal control of the dynamics of the insulin-glucose balance in human blood, represented by a nonsmooth system of differential equations with a constant delay. **Aim.** This study is aimed at developing and numerically solving the problem of optimal control of the glycemic profile in patients with type 1 diabetes mellitus by insulin therapy, based on the optimality conditions for nonsmooth systems with a constant delay in the phase variable. **Methods.** The general research technique of the problem under study is based on the mathematical theory of optimal control, the theory of numerical methods, the theory of differential equations with a nonsmooth right-hand side and with a lagging argument. When implementing the software package, the methods of object-oriented design are used. **Results.** In this study, on the basis of the initial dynamic model proposed by N.A. Shirokova, the problem of optimal control of the dynamics of glycemic regulation in patients with type 1 diabetes mellitus with a nonsmooth right side and a constant delay in the phase variable is constructed. On the basis of the necessary optimality condition obtained for the constructed optimal control problem, algorithmic and software tools have been developed, with the help of which optimal programs are obtained, and their meaningful interpretation is presented. **Conclusion.** The results obtained on the basis of the software implementation of numerical algorithms of the developed nonsmooth problem of optimal control of the insulin-glucose balance with a constant lag in the phase variables, make it possible to obtain the data that are necessary for monitoring the situation regarding the change in the glycemic profile, for predicting diabetes mellitus and choosing an effective treatment.

Keywords: modeling, optimal management, diabetes mellitus, optimal compensation programs.

References

1. Hanas R. *Diabet 1 tipa u detey, podrostkov i molodykh lyudey: stat' ekspertom v svoem diabete* [Type 1 Diabetes in Children, Adolescents and Young People: How to Become an Expert in Your Diabetes]. Moscow, Art-Business-Center, 2011. 431 p.
2. Dreval A.V., Novoseltsev V.N., Orkina E.L. [A Complex Mathematical Model of Diabetes Mellitus in the Assessment of Various Mechanisms of Hyperglycemia Pathogenesis and the Selection of Optimal Pump Insulin Therapy]. *Automation and Telemekhanics*, 1982, no. 11, pp. 174–176. (in Russ.)
3. Dreval A.V., Makolkin V.I., Novoseltsev V.N., Orkina E.L. [Testing Some Hypotheses about the Pathogenesis of Diabetes by the Method of Mathematical Modeling]. *Biophysics*, 1983, vol. 28, no. 5, pp. 866–872. (in Russ.)
4. Karpelyev VA, Filippov Yu.I., Tarasov Yu.V., Boyarsky M.D., Mayorov A.Yu., Shestakova M.V., Dedov I.I. [Mathematical Modeling of the Glycemic Regulation System in Patients with Diabetes Mellitus]. *Bulletin of the Russian Academy of Medical Sciences*, 2015, vol. 70, no. 5, pp. 549–560. (in Russ.)
5. Lyabakh N.N. *Sakharnyy diabet: Monitoring, modelirovaniye, upravleniye* [Diabetes Mellitus: Monitoring, Modeling, Management]. Rostov-on-Don, 2004. 138 p.
6. Sveshnikova A.N., Pantelev M.A., Dreval A.V. [Theoretical Estimation of the Parameters of Glucose Metabolism on the Basis of Data from Continuous Monitoring of Glycemia Using Mathematical Modeling]. *Biophysics*, 2017, vol. 62, no. 5, pp. 1023–1029. (in Russ.)
7. Makroglou A., Li J., Kuang Y. Mathematical Models and Software Tools for the Glucose-Insulin Regulatory System and Diabetes: an Overview. *Applied Numerical Mathematics*, 2006, no. 56, pp. 559–573.
8. Thomas S.J. A Physiological Model of Glucose Metabolism in Man and Its Use to Design and Assess Improved Insulin Therapies for Diabetes. Thesis (Sc. D.). Boston, MIT, 1985. 556 p.
9. Markakis M.G., Mitsis G.D., Marmarelis V.Z. Computational Study of an Augmented Minimal Model for Glycaemia Control. *Proceedings of the 30th IEEE EMBS Annual International Conference*. Canada, 2008, pp. 5445–5448.

Краткие сообщения

10. Shirokova N.A. [Mathematical Modeling of the Insulin-Glucose Balance in the Blood and the Glycemic Regulation System in Patients with Diabetes Mellitus]. *Mathematical Structures and Modeling*, 2002, no. 10, pp. 106–115. (in Russ.)
11. Shirokova N.A. [Mathematical Modeling of Glucose and Insulin Sources in the Insulin-Glucose Balance Model]. *Mathematical Structures and Modeling*, 2004, no. 14, pp. 47–52. (in Russ.)
12. Shirokova N.A., Shirokov I.V. [Mathematical Model of the Balance “Glucose – Insulin – Glucagon” in Human Blood]. *Bulletin of Omsk University*, 2006, no. 3, pp. 51–53. (in Russ.)
13. Kozheko L.G., Tsiruleva V.M., Shapovalova I.A. [Research and Numerical Implementation of the Mathematical Model of the Problem of Correcting Blood Sugar Levels]. *Vestnik TVGU. Series: Chemistry*, 2018, no. 1, pp. 169–178. (in Russ.)
14. Andreeva E.A., Tsiruleva V.M. *Matematicheskoye modelirovaniye: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Mathematical Modeling: Textbook. Manual for Universities]. Tver, Tver State University, 2004. 502 p.
15. Andreeva E.A., Tsiruleva V.M. *Variatsionnoye ischisleniye i metody optimizatsii* [Calculus of Variations and Optimization Methods]. Tver, Tver State University, 2004. 575 p.
16. Gromov Yu.Yu., Ivanova O.G., Alekseev V.V. *Spetsial'nyye razdely teorii upravleniya. Optimal'noye upravleniye dinamicheskimi sistemami* [Special Sections of Control Theory. Optimal Control of Dynamic Systems]. Tambov, Publishing house of TSTU, 2012. 108 p.

Received 10 September 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Болодурина, И.П. Оптимальное управление динамикой регуляции гликемии у больных сахарным диабетом первого типа / И.П. Болодурина, Ю.П. Иванова (Луговскова), Л.М. Анциферова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 144–154. DOI: 10.14529/ctcr200415

FOR CITATION

Bolodurina I.P., Ivanova (Lugovskova) Yu.P., Antsiferova L.M. Optimal Control of Glycemia Regulation Dynamics in Patients with Type I Diabetes Mellitus. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 144–154. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200415

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 д.т.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, № 4

16+

Редактор *С.И. Уварова*
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 30.10.2020. Дата выхода в свет 09.11.2020. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 18,13. Тираж 500 экз. Заказ 315/366. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.