

ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2019
Т. 19, № 3

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

СЕРИЯ

«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

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

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

Основной целью издания является пропаганда научных исследований в следующих областях:

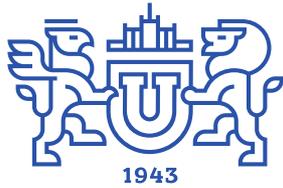
- Автоматизированные системы управления в энергосбережении
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами
- Антенная техника
- Инфокоммуникационные технологии
- Информационно-измерительная техника
- Навигационные приборы и системы
- Радиотехнические комплексы
- Системы автоматизированного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

Редакционная коллегия:

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

2019
Vol. 19, no. 3

SERIES

“COMPUTER TECHNOLOGIES,
AUTOMATIC CONTROL,
RADIO ELECTRONICS”

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

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

South Ural State University

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

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

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

Editorial Board:

Shestakov A.L., Dr. of Sci. (Eng.), Prof. (*editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
Burkov V.N., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*deputy editor-in-chief*), Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;
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;
Plotnikova N.V., Cand. of Sci. (Eng.), Ass. Prof. (*executive secretary*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
Barkalov S.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Voronezh State Technical University Voronezh, Russian Federation;
Berezansky L., PhD, Prof., Ben Gurion University of the Negev, Israel;
Dzhaparov B.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Archive of the President of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan.
Zatonskiy A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science and Education of the Russian Federation, Berezniki Branch of the Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia;
Kulikov G.G., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation;
Mazurov V.D., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation;
Maksimov A.A., Dr. of Sci. (Eng.), Open Joint Stock Company ‘Kuznetsk Ferroalloys’, Novokuznetsk, Russian Federation;
Melnikov A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russian Federation;
Prangishvili A.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of National Academy of Sciences of Georgia, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia;
Shchepkin A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;
Yachikov I.M., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Magnitogorsk State Technical University of G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation.

Editorial Council:

Averbakh I., PhD, Prof., University of Toronto, Canada;
Braverman E., PhD, Prof., St. Mary's University, Calgary, and Athabasca University, Department of Science, Athabasca, Canada;
Degtyar' V.G., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Academician V.P. Makeyev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation;
Kazarinov L.S., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
Kibalov E.B., Dr. of Sci. (Econ.), Prof., Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation;
Novikov D.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;
Panferov V.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russian Federation;
Slinko A., PhD, Prof., University of Auckland, New Zealand;
Stolbov V.Yu., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation;
Tanana V.P., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
Ukhotov V.I., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
Ushakov V.N., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, N.N. Krasovskiy Institute of Mathematics and Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation;
Shestakov I., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., São Paulo University, Brazil;
Shiryayev V.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
Schneider D.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
Shtessel Yu., PhD, Prof., Huntsville, Alabama, USA.

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика и вычислительная техника

ALHUMAIMA A.S., ABDULLAEV S.M. Landscape Approach to Normalized Difference Vegetation Index Forecast by Artificial Neural Network: Example of Diyala River Basin	5
КОДИРОВ Ш.Ш., ШЕСТАКОВ А.Л. Разработка искусственной нейронной сети для прогнозирования прихватов колонн бурильных труб	20
GUDKOV V.Yu., LEPIKHOVA D.N., GAVRILOVA M.L., ZYMBLER M.L. Using Delaunay Triangulation for Fingerprint Template Generation	33

Управление в технических системах

KODKIN V.L., ANIKIN A.S., BALDENKOV A.A. Control of Nonlinear Dynamics of Electromechanical Systems	42
ПАНФЕРОВ В.И., ПАНФЕРОВ С.В., ХАЛДИН К.С. Параметрическая идентификация модели объекта управления по переходной функции работающей системы автоматического регулирования	52

Инфокоммуникационные технологии и системы

ZATONSKIY A.V. Verification of Kolmogorov Equation Usability for Reproduction and Death Processes ...	60
---	----

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

БЕЛОУСОВ М.Д. Оценка точности измерения термопреобразователей сопротивления в процессе работы	68
---	----

Управление в социально-экономических системах

БУРКОВ В.Н., ЩЕПКИН А.В., АМЕЛИНА К.Е., ДАУЛБАЕВА З.М., РЯЗАНЦЕВ С.А. Комплексный механизм управления развитием организации	79
ЖИГАЛОВ И.Е., МОНОГАРОВ О.И. Алгоритм поддержки принятия решений в управлении качеством изготовления кабельной изоляции	94
КИБАЛОВ Е.Б., ШИБИКИН Д.Д. Оценка крупномасштабных железнодорожных проектов: неосистемный подход	104
ЛОГИНОВСКИЙ О.В., ШЕСТАКОВ А.Л., ГОЛЛАЙ А.В. Современные информационные технологии и необходимость повышения качества управления организационными и корпоративными структурами	116
КОПОТЕВА А.В. Случайное поведение участника как способ максимизации вероятности его выигрыша в парадоксе Монти Холла	126
КРЯЖЕВ С.А., ЛЕВКОВСКИЙ Д.И. Информационная система поддержки рабочей программы дисциплины	135
GUSEV E.V. Using Object Construction Model for Implementation Building Works Management	147

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

ШНАЙДЕР Д.А., КАЛИНИНА Е.А. Повышение производительности дробильно-обогащительной фабрики на основе оптимизационной модели	156
--	-----

Краткие сообщения

МАКАРЕНКО К.В., ЛОГИНОВСКАЯ В.О. «Умный город»: стандарты, проблемы, перспективы развития	165
---	-----

CONTENTS

Informatics and Computer Engineering

ALHUMAIMA A.S., ABDULLAEV S.M. Landscape Approach to Normalized Difference Vegetation Index Forecast by Artificial Neural Network: Example of Diyala River Basin	5
QODIROV Sh.Sh., SHESTAKOV A.L. Development of Artificial Neural Network for Predicting Drill Pipe Sticking	20
GUDKOV V.Yu., LEPIKHOVA D.N., GAVRILOVA M.L., ZYMBLER M.L. Using Delaunay Triangulation for Fingerprint Template Generation	33

Control in Technical Systems

KODKIN V.L., ANIKIN A.S., BALDENKOV A.A. Control of Nonlinear Dynamics of Electromechanical Systems	42
PANFEROV V.I., PANFEROV S.V., HALDIN K.S. Parametric Identification of the Model of Object Management by Transitional Function Working System Automatic Regulation	52

Infocommunication Technologies and Systems

ZATONSKIY A.V. Verification of Kolmogorov Equation Usability for Reproduction and Death Processes ..	60
--	----

Instrument Engineering, Metrology and Information and Measuring Devices and Systems

BELOUSOV M.D. Evaluation of Measurement Accuracy of the RTD Transducer during Operation	68
---	----

Control in Social and Economic Systems

BURKOV V.N., SHCHEPKIN A.V., AMELINA K.E., DAULBAEVA Z.M., RYAZANTSEV S.A. Complex Mechanism of Development Management of the Organization	79
ZHIGALOV I.E., MONOGAROV O.I. The Algorithm of Decision Support in Quality Governance of the Cable Insulation Manufacture	94
KIBALOV E.B., SHIBIKIN D.D. Evaluation of Large-Scale Railway Projects: an Unsystem Approach	104
LOGINOVSKIY O.V., SHESTAKOV A.L., HOLLAY A.V. Modern Information Technologies and the Need to Improve the Quality of Management of Organizational and Corporate Structures	116
KOPOTEVA A.V. Winning Probability Maximization Using Random Participant Behavior in the Monty Hall Dilemma	126
KRYAZHEV S.A., LEVKOVSKY D.I. Information System for the Support of the Work Program of the Discipline	135
GUSEV E.V. Using Object Construction Model for Implementation Building Works Management	147

Automated Process Control Systems

SHNAYDER D.A., KALININA E.A. Productivity Increasing of the Crushing and Beneficiation Plant Based on the Optimization Model	156
--	-----

Brief Reports

MAKARENKO K.V., LOGINOVSKAYA V.O. "Smart City": Standards, Problems, Development Prospects	165
--	-----

LANDSCAPE APPROACH TO NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX FORECAST BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORK: EXAMPLE OF DIYALA RIVER BASIN

A.S. Alhumaima, *engineer_alisubhi@yahoo.com*,

S.M. Abdullaev, *abdullaevsm@susu.ru*

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

This study examines the perspective of artificial neural networks for forecast Normalized Differential Vegetation Index (NDVI) on Diyala River basin and also how information about of bioclimatic landscapes will affect to forecasting performance. To do this, in the first stage of the experiment, a total of 20 perceptrons with different one hidden layer architectures were trained with site-specific variables (latitude, longitude, minimal, maximal and mean height, landcover type) and seasonal meteorological variables (precipitation sum, and minimal, maximal and average daily temperatures) by error back propagation algorithm on the data of 2000–2010 years and tested on data for 2011–2016 years. It has been shown that the best performance, with determination coefficient R^2 of 0.78, was achieved by perceptron model with 12 hidden neurons the activated by logistic activation function and hyperbolic tangential activation of output value of NDVI. The large spatial heterogeneity of forecasting performance of the best perceptron was detected: in upper part of basin characterized according to Köppen – Trewartha bioclimatic classification, as landscapes of temperate mountain climate and the subtropical climate with dry summers, R^2 was 0.76–0.80, whereas in dry steppe landscapes and semi-desert landscapes of Diyala downstream R^2 was 0.6–0.7. The second stage of experiments with 20 models of perceptrons where the type of landscape was added as input variable or where 150 individual perceptrons were selected for each landscape, have shown that these approaches allows to R^2 increase up to 0.73–0.85. However, the strong contrast between characteristics of individual models complicates their use in the practice and requires to finding of new forecasting approaches.

Keywords: remote sensing, NDVI forecast, perceptron, bioclimatic landscapes, precipitation, temperature, climatic response.

Introduction

Modern Earth sciences are not conceivable without the analysis of multispectral satellite data. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and other proxies of primary biological productivity are important products of this analysis [1]. The values of NDVI are highly depended on environmental conditions, so that NDVI is one of principal indicators for evaluating climate impact onto terrestrial ecosystems [2–12]. Particularly, extent and evolution NDVI are often used to estimate climate changes global and vegetation activity [2, 3] and net primary production and vegetation dynamics overlarge arid regions such as Sahel [4, 5], arid regions of Central Asia and Kazakhstan [6, 7], Mongolia and arid area of China [8, 9], Tibetan Plateau [10]. In addition to monitoring arid zones in the works [11, 12] explores the long-period changes in forest-steppe, forest and tundra vegetation of the Russian Federation.

Mapping of NDVI dynamics is one of the main instruments for evaluation and prediction of agricultural productivity [13–18]. First, as in the case of natural biomes, some work explore the impact of climate change on productivity of rain-fed zones [13] and other use NDVI data to model of ecological regimes of rural territory [14]. The changes in vegetation indices of rural areas allows to separate healthy vegetation crops from weak developed fields in irrigated agriculture [15]; to monitor droughts [16, 17] and, with availability of additional surface data, to implement crop forecast [18]. From this point, the capabilities to predict vegetation index under an appropriate spatiotemporal scale [13–18] are critical for decision making to adapt agricultural techniques or to limit socio-economic losses associated with urbanization [19, 20].

In the analysis of remote sensing data are used by all kinds of statistical analysis and machine learning techniques [21]. For example, the linear regressions [22–24] are used in the analysis of NDVI time series; the stepwise cluster analysis is used to NDVI simulation [25] and artificial neural network (ANN) to short-range NDVI forecast [26]. Recently began studies related to the application of the ensemble approach. So in the forecast NDVI model [27] uses deep stacking network, consisting of a stack of multi-layer perceptron, each of which models the spatial feature of the associated region at a particular time instant. The study [28] estimates vegetation health on the basis of trained gradient boosted machine models, which combine gradient-based optimization and boosting of base trees models that divide predictor variable into distinct geographic regions.

The main objective of this work is to develop a ANN based prediction model of NDVI, which (i) would take into account changes in rainfall and temperature in the basin of the river Diyala; and (ii) at the same time could be useful in other regions. The relevance of first question is related with unknown reaction natural-human systems the Tigris River basin to climate change [29] and that can be explored by simple multilayer perceptron model. The relevance of second question is related to success of ensembles stacking and boosting [27, 28] where individual model of ensemble member is constructed by specific geographical information. At the same time, simple and ensemble networking approaches possess a general inability to understand cause-and-effect relationships between the input and output of such networks.

The main idea of present study is to associate all possible geographical predictors on input layer of ANN with some form of geographical landscapes. The geographical landscape can be defined as a homogeneous geosystem (in origin and history of development) with a specific uniform of indivisible by zonal factors terrain, geological base, regional climate and hydrothermal conditions, types of soil and ecological communities [30]. The landscape can be introduced as a collection of smaller geosystems or “natural boundaries” – specific morphological elements of the landscape that contains natural communities merged by unique physical and geographical processes and developed on one form of the landscape terrains and homogeneous substrate. The concept of the natural boundaries is quite useful in the ecological assessment studies where it allows introduction of the anthropogenic landscapes [31]. Perceiving this ideological content as a basis, we nonetheless adopt the technical definition of landscape classification [32]: the degree of climate continentality; belonging to morphological structures of the highest order; the splitting of the terrain; bioclimatic differences and geochemical type (the simplification of “geochemical catena” position to the maximum, mean and minimum elevation of smallest landscape unit is used in our study).

On the basis of the above, the objectives of the work consisted of 1) processing the digital terrain data and comparing two climate data sets for classification of bioclimatic landscapes of Diyala; 2) finding a set of best predictors described hydrothermal regime which influence to NDVI value; and finally 3) to determine the best ANN architecture working in all types of landscapes.

The rest of paper is organized onto 3 sections: 1) datasets and methods with brief overview of the study area, evaluation of climate datasets and landscape classification; 2) ANN forecasting results, and 3) short conclusion.

1. Datasets and methods

Four stages of geo-climatic information processing have been performed in our research work in order to get the required results. All the results presented in this paper have been calculated using MATLAB programming language version R2018b, whereas the ArcGIS version 10.5 has been used to simulate the results as geographical maps.

1.1. Land cover and topography of study area

Diyala river basin shapefile used within the ArcGIS has been projected using the maps presented in the inventory of shared water resources in western Asia by the United Nations Economic and Social Commission for Western Asia [33]. The Diyala river basin with a total area of 32,600 km², located approximately between 33.216°–35.833°N and 44.500°–46.833°E and distributed between Iraq (43%) and Iran (57%).

The data from digital elevation model (DEM) are used in this paper both as input variable and to landscape classification. These data were extracted from the Advanced Spaceborne Thermal Emission

and Reflection Radiometer (ASTER) Global DEM which is distributed from ASTER website (<https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>) as Geo-referenced Tagged Image File Format file containing $1^\circ \times 1^\circ$ tiles of earth surface with height and latitude, longitude of 30-meter grid and other additional information [34]. Overlaying boundaries of the basin of Diyala to DEM data (Fig. 1a), it is easy to see that the nature of the relief from the beginnings of Diyala to your mouth varies significantly: large portion of terrain in Iran part of basin is mountainous with peak of 3356 m and becomes abruptly flat on Iraqi part of basin.

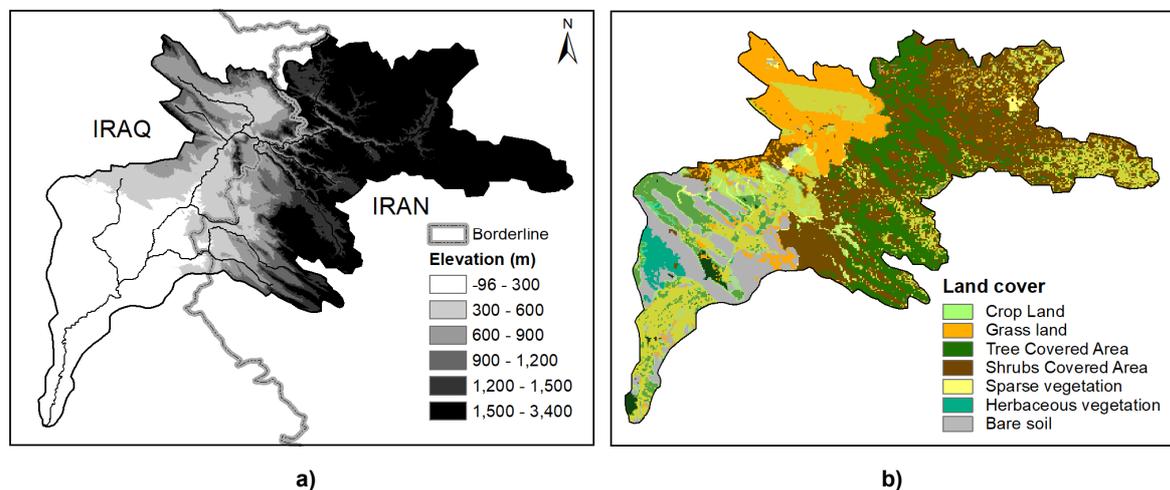


Fig. 1 Study area (a) elevation level according to the ASTER Global DEM; (b) cover types based on the GLC-SHARE classification

Land cover map of basin (Fig. 1b) was obtained from the Global Land Cover-SHARE (GLC-SHARE [35]) database, version 2014, with a spatial resolution of 30" arc-seconds (<http://www.fao.org/geonetwork>). The GLC-SHARE is a new land cover database created by the Land and Water Division of the Food and Agriculture Organization of the United Nations in partnership with contributions from various institutions by a combination of "best available" land cover database.

According to GLC-SHARE dataset the main land cover categories of the study area are: bare soil ~ 12%, croplands ~ 18%, grasslands ~ 16%, shrub covered areas ~ 26%, tree covered areas ~ 9%, sparse vegetation ~ 14%, and herbaceous cover. Thus, about 34% of Diyala basin occupy by arable fields and pastures, and 35% can be attributed to natural vegetation (shrubs and forest). Therefore, should be expected that the vegetation of these areas will react differently to the thermal regime and the excess or deficiency of the accumulated moisture. All this promises that the basin of Diyala will be difficult place for the prediction of the response of the response of vegetation to changes in weather and climate.

1.2. NDVI and other data preprocessing

Terra and Aqua are two earth observation satellites that were launched by NASA in 1999 and 2002, respectively. One of the instruments carried by both the Terra and Aqua satellites is the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). MODIS acts a significant role in meeting a very wide range of scientific research objectives like the monitoring of vegetation cover change. In this study, MODIS NDVI dataset (MOD13Q1) [36] of the finest available spatial resolution of 250 m and 16-day composites has been directly obtained from USGS data-center (<https://www.usgs.gov>). The 34 of 16-day MODIS NDVI composite images centered on March, 7 and March, 23 for period of 17 years (2000–2016) were chosen in order to reduce cloud impacts and to ensure a high chance of having the best quality of pixels representing the NDVI cover.

The preprocessing stage includes: first: extract data that only related to or within the boundaries of our study area, second: from the 2 maps of each March month, construct one map (i.e. 17 monthly maps for our study period) using maximum value composite method to reduce cloud disturbance and increase the overall quality of the dataset [37], and third: remove missing data and NDVI values which are less than 0.1 to reduce unwanted signals coming from potentially non-vegetated pixels (bare soil and ice cover) [38]. For the precipitation and temperatures, the preprocessing stage includes only data extraction

that related to our study area for the period (1981–2016). The same situation is for the land cover and digital elevation datasets, where the preprocessing stage includes only extracting maps that related to our study area. It is clear that our downloaded data of Diyala river basin are not in the same spatial resolution, therefore we have converted all of them into a $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ grid resolution, resulting in up to 1520 grid sample. We combined these datasets and reshaped them into a singular matrix where each row ($1520 \times 17 = 25\,840$ row) corresponds to a grid sample at one time and each column (11 input-output variables) is a measured factor or variable.

1.3. Climate Datasets evaluation

Two climate datasets have been used in this paper, the first one obtained from the University of East Anglia (UEA)/ Climatic Research Unit (CRU) (Version 4.01) [39], which provides monthly total precipitation and monthly mean, minimum, and maximum surface air temperatures for the period 1901–2016. The second dataset used in this paper which are the observations of monthly total precipitation and monthly mean surface air temperatures for the period 1900–2017 are obtained from the University of Delaware (Version 5.01) [40]. The two datasets provide a monthly global gridded data at spatial resolution of $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.

For the temporal correlation analysis, the nonparametric Spearman correlation method, which it is characterized by its robustness against the effect of outliers, has been performed in order to investigate the effects of essential environmental variables, namely precipitation and temperatures time series data on the variability of NDVI. This process is very important if we want to obtain the best prediction performance, where it has been used to explore in which accumulated amounts, we must use our meteorological predictors before using them with the ANN models.

To determine the best-accumulated amounts of the precipitation and temperature that have the most influence on the NDVI vegetation index of March growing month within our study area and that could enhance the results of the ANN models, the nonparametric Spearman correlation (SR) analysis has been used. The correlation coefficients SR and their significance levels (p) for CRU and UD datasets are presented in Table 1. Thus, we can see from the table that the SR between March NDVI with CRU precipitation and temperatures are positive and generally have major absolute values comparing to the correlation coefficients of UD dataset.

Table 1

Spearman correlation (SR) between NDVI and meteorological factors

Months	CRU dataset								UD dataset			
	Mean Precip.		Mean Temp.		Min Temp.		Max Temp.		Mean Precip.		Mean Temp.	
	SR	p	SR	p	SR	p	SR	p	SR	p	SR	p
Mar.	0.47	0.06	0.29	0.26	0.53	0.03	0.08	0.76	0.12	0.64	0.16	0.53
Feb.–Mar.	0.15	0.57	0.53	0.03	0.66	0.01	0.37	0.14	–0.23	0.37	0.40	0.11
Jan.–Mar.	0.12	0.65	0.65	0.01	0.66	0.01	0.65	0.02	–0.25	0.34	0.59	0.01
Dec.–Mar.	0.21	0.42	0.40	0.11	0.51	0.04	0.27	0.30	–0.11	0.67	0.40	0.12
Nov.–Mar.	0.40	0.11	0.43	0.08	0.59	0.01	0.24	0.36	0.29	0.26	0.39	0.12
Oct.–Mar.	0.68	0.01	0.41	0.11	0.60	0.01	0.17	0.51	0.51	0.06	0.38	0.14

The main results of correlation analysis depicted by bold letters: the vegetation index is moderately correlated (SR = 0.68) with the CRU total precipitation of winter season from October of last year to March and NDVI is correlated (SR = 0.65–0.66) with accumulated CRU temperatures during January to March. Despite of the moderate degree of CRU correlation coefficients, their significance level is 99%, and bearing in mind that this database provides optional minimum and maximum temperatures, we will only use CRU data.

1.4. Bioclimatic landscape classification

The bioclimatic classification of Köppen – Trewartha (K–T) [41–43] can be obtained by applying their K–T criteria to at least 30 years of observations of mean monthly precipitation and air temperature. The general groups of bioclimatic classifications established by the K–T are A: tropical humid climates, B: dry climates, C: subtropical climates, D: temperate climates, E: boreal climates, and F: polar climates.

One of the main features of the K–T classification is to delineate dry climates BS (steppes) and BW (deserts) by dryness threshold R. The dryness threshold R (mm) is defined in [42] as $R = 23T - 6.4Pw + 410$, where T: mean annual temperature (°C) and Pw is the percentage of annual precipitation occurring in winter.

The general climate groups are further sub-divided based on temperature and precipitation seasonality. Thus, Cs climate is subtropical climate with dry summer (more 70% of precipitation during winter). A third and fourth letter can be added to include information about the warmest and coldest months for every climate class. For example, the temperate continental climates DC with summer temperatures 18–22 °C and winter –9–0 °C, will be described as DCbo, and if an elevation is higher than 1000 m are changed to mountains climates GDCbo. See [41–43] for more details about K–T bioclimate classification rules and descriptions.

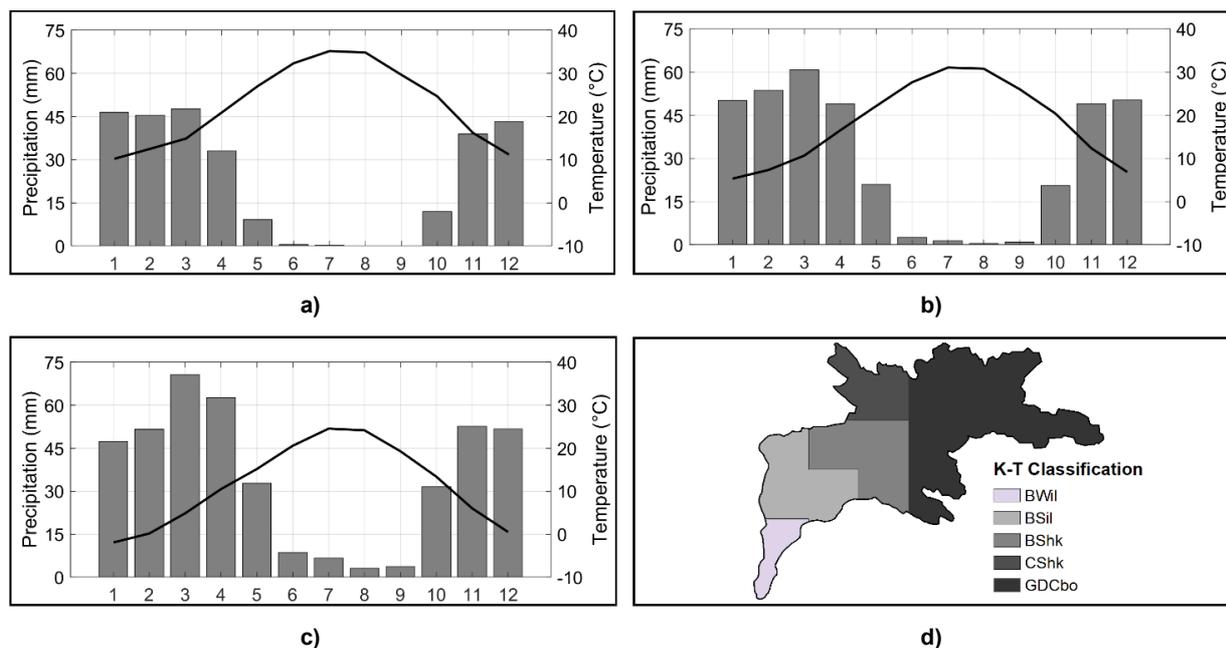


Fig. 2. Annual course of temperature and rainfall of steppes (a), subtropical (b) and temperate climates (c) in Diyala basin (1981–2016). The Köppen – Trewartha classification of climates is presented on Fig. 2d

In this study, applying classification rules [41–43] to the 30 years-based CRU monthly precipitation and temperature gridded data in Diyala basin we obtain five (5) bioclimatic landscapes types BWil, BSil, BShk, Cshk and GDCbo. Fig. 2a–c illustrates the annual hydrothermal regimes of BSil, Cshk and GDCbo landscapes and Fig. 2d present spatial distribution of these landscapes. It is evident from Fig. 2a–c that precipitation in steppes, subtropical and temperate climates rainy season lasts from November to April, and May is transition months to dry summer which lasts from June to September in dry and subtropical climates, and with only some convective precipitation in temperate mountains climates.

The end of the rainy season was the main starting point for the selection of the March or April for the characteristics of the vegetation period. If you look at the climate map (Fig. 2d) and temperature charts (Fig. 2a–c), it becomes clear why the month of March was chosen for the characteristics of the vegetation period. Firstly, desert, steppe and subtropical climates occupy a large portion of the basin. For dry climates (Fig. 2a) do not have temperature limits for the growing season, here, is almost always, the temperature is above +10 °C, and conditions for the growth of winter are only limited by soil moisture. In these regions, the irrigated year-round farming is applied. In subtropical landscapes of Diyala (Fig. 2b), the mean temperatures of 3 month, from December to February, are below +10 °C, but March temperatures generally above +10 °C, and taking into account the truth that grass communities start vegetate at +5 °C, the March is months of active vegetation period for the subtropical and dry climate biomes. It is clear from Fig. 2c that the temperature of GDCbo forest landscapes becomes above +10 °C only at April. This means that our study is mainly describe the growing season and consequently the green mass productivity of desert, steppes and subtropical landscapes. On the other hand, we can see

from Fig. 1 that these landscapes are the most exploited by agriculture, and therefore the most exciting challenge is predicting the NDVI of these landscapes.

2. Application of ANN to NDVI forecast

In the Earth sciences, the popularity of ANNs has grown mainly to solve prediction problems with nonlinear, stochastic nature, or unknown variations of variables. [21, 26, 27, 44]. Although we know a priori [45], that lack of winter rains causes adverse arid conditions in Tiger basin, i.e. reducing the NDVI, we nevertheless try to prove that besides the meteorological parameters and land cover category, an important role in the response vegetation plays a landscape type itself. On the other hand, there is some reason to assume that the response of the vegetation of different landscapes on precipitation and temperature will be non-linear. Therefore, as a starting ANN model we have selected perceptron with one hidden layer. To answer if the landscape types are relevant to explanation of NDVI distribution, in section 2.1 we trained various ANN models without information about landscape and find model having best performance for entire basin and then, in section 2.2, we observe visual results and rated the quality of the forecast of this model for each of the landscapes. Using the results of last procedure as base to comparison we construct new ANN models by using landscape information.

2.1. ANN models without landscape information

To design of the model without landscape information, initially, the ten predictors are used as input neurons: 1) 5 neurons represented the geographical site-specific characteristics: latitude, longitude and minimal, maximal and mean altitude; 2) 4 neurons represent of the meteorological properties derived from CRU data (winter precipitation, and minimal, maximal and mean temperature of January to March); 3) 1 neuron correspond to land cover types. The value NDVI of corresponding March months is considered as output neuron (forecasting value). The period from 2000 to 2010 with 16 720 observations or $\approx 65\%$ of total number of 25 840 input vectors was used to form the training dataset. The period from 2011 to 2016 with 9120 observations or $\approx 35\%$ of total input vectors was used for the testing dataset.

One of the challenges of this work is that choosing of one of four group approaches [46]: from the most primitive trial and error search to the heuristic method using knowledge gained from previous experiments where a near-optimal ANN topology achieved and from exhaustive search through all possible topologies to pruning and constructive algorithms devising an efficient network structure by incrementally adding or removing links. By virtue of the practical prediction NDVI, we have chosen heuristic approach using some preliminary estimates. The review of [47] present dozens equations to calculate number of hidden nodes depending to (i) the number of input and output nodes, or their combinations with (ii) number of samples in training data. We spent 25 calculations on various equations given in [46, 47] and got a different number of nodes from 4 up to 1000, with the highest frequency of the number of nodes between 4 and 9. For these reasons we decided to vary the number of hidden nodes from 4 to 8, 12, 16 and 20 nodes and tracking the model performance during training and testing procedure by using three common metrics: Root-Mean Square Error (RMSE); Mean Absolute Error (MAE); and coefficient of determination (R^2). We also understand that the optimal structure ANN will depend also on the functions of neuronal activation and training algorithm. Therefore, all of 20 different models presented in Table 2 were well-trained with the same Levenberg – Marquardt back propagation algorithm. The difference between models with the same number of hidden nodes was that these hidden nodes were activated by one of two functions, logistic or hyperbolic tangent (tanh) function, and signals from hidden layer were transmitted to the output layer by linear or tangential function. Recall that the coefficient R^2 is the proportion of variance of the dependent variable NDVI which can be explained by variance of 10 predictors, so that the best model is choosing from 20 models as the model with the biggest value of R^2 obtained after testing procedure, and observing also if this value converges with value of R^2 obtaining after training procedures.

As shown in Table 2, the best ANNs are depended both activation function and number of hidden nodes. Thus, model #18 with logistic sigmoid for the hidden layer and hyperbolic tangent functions for output and 12 hidden nodes exhibits the highest R^2 of 0.776 during testing process with little difference with training value of R^2 of 0.814.

Table 2

Training and testing performance of ANN models with 10 input variables

Model #	Transfer function		Hidden nodes	Training performance			Testing performance		
	Hidden	Output		RMSE	MAE	R ²	RMSE	MAE	R ²
1	Tanh	Linear	4	0.082	0.063	0.775	0.112	0.087	0.755
2	Tanh	Linear	8	0.067	0.052	0.853	0.113	0.085	0.745
3	Tanh	Linear	12	0.062	0.047	0.879	0.116	0.088	0.742
4	Tanh	Linear	16	0.058	0.045	0.894	0.122	0.091	0.738
5	Tanh	Linear	20	0.053	0.041	0.911	0.123	0.092	0.724
6	Logistic	Linear	4	0.078	0.059	0.797	0.116	0.089	0.742
7	Logistic	Linear	8	0.068	0.052	0.851	0.118	0.091	0.732
8	Logistic	Linear	12	0.063	0.048	0.875	0.122	0.095	0.708
9	Logistic	Linear	16	0.058	0.045	0.894	0.120	0.090	0.737
10	Logistic	Linear	20	0.054	0.041	0.909	0.131	0.101	0.654
11	Tanh	Tanh	4	0.078	0.060	0.799	0.115	0.088	0.748
12	Tanh	Tanh	8	0.067	0.052	0.856	0.114	0.088	0.768
13	Tanh	Tanh	12	0.060	0.046	0.885	0.114	0.086	0.764
14	Tanh	Tanh	16	0.057	0.043	0.898	0.122	0.096	0.722
15	Tanh	Tanh	20	0.053	0.040	0.912	0.122	0.093	0.713
16	Logistic	Tanh	4	0.062	0.047	0.879	0.120	0.091	0.709
17	Logistic	Tanh	8	0.066	0.050	0.861	0.116	0.089	0.724
18	Logistic	Tanh	12	0.077	0.059	0.814	0.108	0.083	0.776
19	Logistic	Tanh	16	0.055	0.042	0.904	0.120	0.096	0.691
20	Logistic	Tanh	20	0.052	0.040	0.914	0.119	0.091	0.724

From the Table2 it is also obvious that model #1, 6 and 12 with other functions and a smaller number of hidden nodes give similar results with R² = 0.74–0.77. Thus, in these cases, the equivalent coefficient of linear correlation would be equal to 0.85. Note also that difference in performances of the best and worst model is 18%, but if we reject these two cases, the difference of R² would be only 11%.

2.2. ANN with landscape information

Visual comparison of model #18 forecast with actual NDVI maps (Fig. 3) shows that the quality of forecast varies from year to year, and also varies in space.

For example, in the year 2011, while maintaining the overall structure of the active vegetation NDVI > 0.3, the model visibly minimized NDVI values in BWil and BSil landscapes, was close to observed values in BShk and subtropical and temperate landscapes. Comparing the quality of predictions in other years, we can see that in most cases, the model generally underestimates the value of NDVI dry landscapes, with one exception of BShk landscape which almost always stands out a strip of mountain vegetation.

Testing performance of model #18 estimated separately by landscapes (Table 3) depict that performance of the desert and steppe landscapes had markedly lower values of R² than the average value for the entire model, but model #18 good predicted NDVI temperate landscapes.

Given the differences of predictability on landscape level we, ceteris paribus conditions of models #1–20, added landscape types to previous ten predictors and further trained models #21–40 around the entire basin. The best forecast result of #21–40 with shared R² = 0.789 present model #28 with 12 hidden neurons and logistic to linear transfer function. Comparing model performance in the landscapes (Table 3), we observe that new best perceptron has slightly lower capability in temperate and subtropical landscapes but is advanced in very hot desert and steppe landscapes where R² rise to 0.66–0.76 or to 11–14% more relative to model #18. Despite the importance of such an increase, you must say that could not predict which of the models in Table 2 when you add a new input variable will give the best results. For example, the model #8, corresponding to model #28, had demonstrated previously very low potential (Table 3).

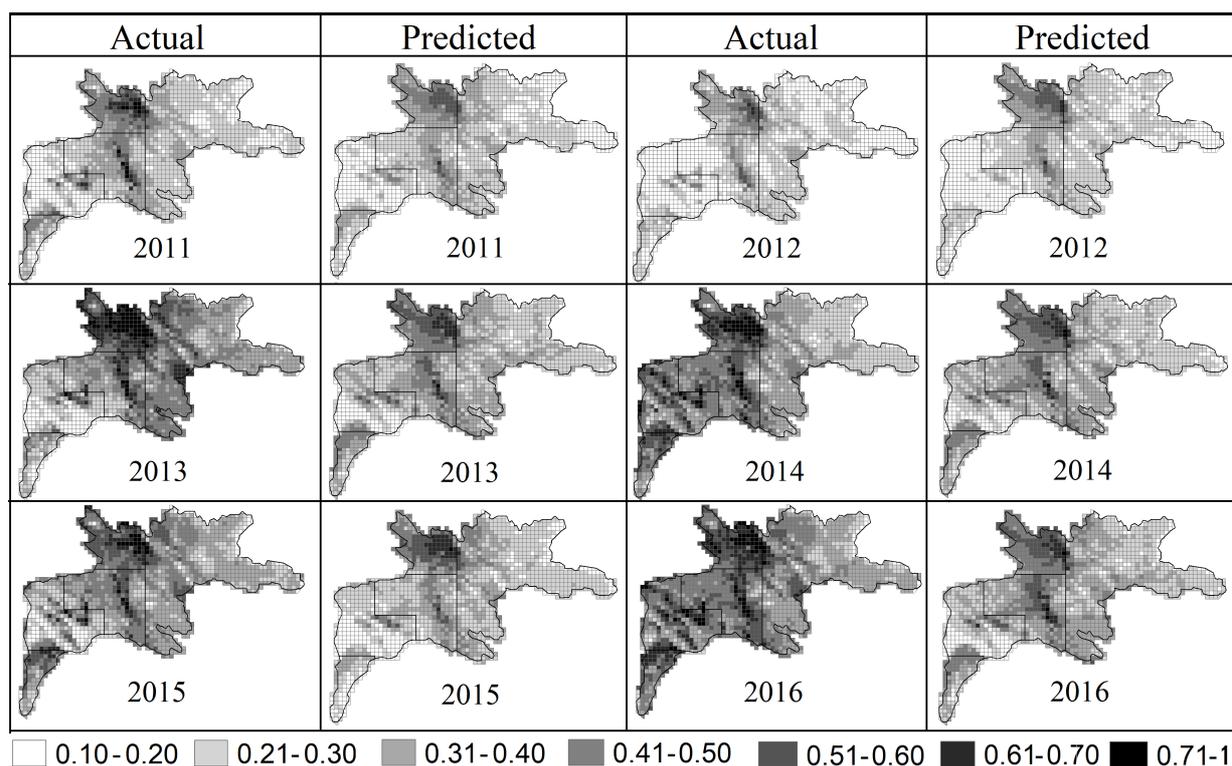


Fig. 3. Vegetation index maps predicted by model #18 against their actual maps for 2011–2016 years. Landscapes are highlighted by thin line

Table 3

Model performance depending on landscape types

Type	Testing performance, $R^2 \times 10^3$			Best individual model description		
	#18	#21–40	#41–190	Hidden	Output	Input variables
BWil	589	656	748	Logistic	Linear	All (10)
BSil	663	760	783	Tanh	Linear	Without Tmin
BShk	717	739	859	Logistic	Tanh	Without Tmin, Tmax
CShk	757	712	728	Logistic	Tanh	As above
GDCbo	801	800	838	Tanh	Tanh	As above

On the other hand, comparison of all 20 models without information about landscapes and 20 models with the addition of landscape types showed average growth of determination coefficient of 5%. Note that R^2 rise was observed for 19 models, but for five model this growth was less than 2%.

Replying to a question whether it is possible to improve the quality of prediction if develop individual models for each of the landscapes, we initially thought that the subtraction of one or more predictors from input layer will reduce the coefficient of determination affecting negatively to testing performances. But as previous experience with adding data showed that it could be the opposite we began to study the impact of removal of the input data. On the other hand, it is obvious that when you rebuild the synapses in new models, past ways of neuron activation need not necessarily be optimal. Therefore, we fix the number of hidden nodes as 12 (as in best model #18, and #28) and then by varying the activation function train and test of 100 ANN models where one input variable (precipitation, minimal temperature Tmin, maximal Tmax, mean temperature) was removed from input; and 25 models with absence of Tmin and Tmax. Totally we create 150 individual ANN models (including 25 models using all ten input variables) or 30 models per landscape and then choose from these 30 models the models which present the best performance in prediction of NDVI of certain landscape (Table 3).

Looking at Table 3, we see that only one best model created for desert landscape need all meteorological data. For other landscapes, the best models require only one or two temperatures. In general, two models for steppe (BShk) and subtropical landscape (Cshk) inherit the logistic and hyperbolic tangent

activation functions of the model #18, and model for desert landscape was the heiress of model #28, the remaining two best individual models reproduced the other probable combinations of hidden and output transfer functions. Comparing the quality of individual models with performance of ANN #28, it can be seen that the improvements in 14–16% concern only models of two dry very hot landscapes, but the performance of models developed for other landscapes rises only to 2–3%.

Conclusion

This work investigated the possibility of ANN trained on conventional geographic and specially adapted meteorological data to predict of NDVI values over Diyala river basin with spatial resolution of ~ 5 km. The principal feature of our work was that we initially assumed that delineation of large basin by geographical landscapes and using landscape type as additional input variable or as spatial boundary for individual models construction can improve the performance of ANN forecasting. The analysis of climate data reveals that Diyala intersects four main Köppen – Trewartha climates from temperate and subtropical climates to steppe with two subtypes and desert climates. For the purity of the experiment we construct ANN models representing perceptrons with one hidden layer and different number of hidden nodes and four combination of layer activation function, and after that all 20 ANN were trained by errors backpropagation algorithm over dataset without landscape data. This was done in order to find the best model configuration which has a biggest coefficient of determination R^2 during testing procedure. Despite the moderate level of $R^2 \approx 0.78$ of the best model, it turned out that the NDVI value of desert and steppe landscapes was predicted by this model noticeably worse with $R^2 = 0.59–0.66$. We found that adding the type of landscape to input layer of the previous models improves the mean performance for 5%, especially to desert and steppe landscapes, where the proportion of explained variance grew by 11–14%. However, the best performances with $R^2 = 0.73–0.86$ were obtained when models were training and testing individually within the boundaries of one of five landscapes types. Analysis of performance of 150 ANN individual models, reveal that the optimal configuration of model developed to certain landscape can completely be different from the configuration of optimal models of other landscapes. This fact and the evidence of the climate and landscape changing complicate the prospects of using neural networks to forecast the nature of vegetation. On the other hand the analysis of application of neural network to forecast of complex environmental systems allows us to create some preliminary requirements when new types of forecasting will appear.

References

1. Tucker C.J. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979, vol. 8, no. 2, pp. 127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0
2. Bounoua L., Collatz G.J., Los S.O. et al. Sensitivity of Climate to Changes in NDVI. *Journal of Climate*, 2000, vol. 13, no. 13, pp. 2277–2292. DOI: 10.1175/1520-0442(2000)013<3C2277:SOCTCI>3E2.0.CO;2
3. De Jong R., Schaepman M.E., Furrer R. et al. Spatial Relationship between Climatologies and Changes in Global Vegetation Activity. *Global Change Biology*, 2013, vol. 19, no. 6, pp. 1953–1964. DOI: 10.1111/gcb.12193
4. Brandt M., Mbow C., Diouf A.A., Verger A., Samimi C., Fensholt R. Ground- and Satellite-Based Evidence of the Biophysical Mechanisms Behind the Greening Sahel. *Global Change Biology*, 2015, vol. 21, no. 4, pp. 1610–1620. DOI: 10.1111/gcb.12807
5. Ardöa J., Tagesson T., Sadegh J., Khatir A. MODIS EVI-based Net Primary Production in the Sahel 2000–2014. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, vol. 65, pp. 35–45. DOI: 10.1016/j.jag.2017.10.002
6. Li Z., Chen Y., Li W., Deng H., Fang G. Potential Impacts of Climate Change on Vegetation Dynamics in Central Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, vol. 120, pp. 12345–12356. DOI: 10.1002/2015JD023618
7. Propastin P.A., Kappas M., Erasmi S., Muratova N.R. Assessment of Desertification Risk in Central Asia and Kazakhstan Using NOAA AVHRR NDVI and Precipitation Data. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2007, vol. 4, no. 2, pp. 304–313.
8. Tulokhonov A.K., Tsydyпов B.Z., Voloshin A.L., Batueva D.Zh., Chimeddorj Ts. Spatio-temporal Characteristics of Vegetation Cover of Arid and Semiarid Climatic Zones in Mongolia on

the Basis of Vegetation Index NDVI. *Arid Ecosystems*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. 61–68. DOI: 10.1134/S2079096114020115

9. Xu Y., Yang J., Chen, Y. NDVI-Based Vegetation Responses to Climate Change in an Arid Area of China. *Theoretical and Applied Climatology*, October 2016, vol. 126, no. 1–2, pp. 213–222. DOI: 10.1007/s00704-015-1572-1

10. Chu D., Lu L., Zhang T. Sensitivity of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Seasonal and Interannual Climate Conditions in the Lhasa Area, Tibetan Plateau, China. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2007, vol. 39, no. 4, pp. 635–641. DOI: 10.1657/1523-0430(07-501)[CHU]2.0.CO;2

11. Medvedev M.A., Savin I. Yu., Bartalev S.A., Lupian E.A. [Usage of NOAA AVHRR Data for Detection of Vegetation Dynamics in Northern Eurasia]. *Study of Earth from Space*, 2011, no. 4, pp. 55–62. (in Russ.)

12. Elsakov V.V. [Spatial and Interannual Heterogeneity of Changes in the Vegetation Cover of Eurasian Tundra: Analysis of 2000–2016 MODIS Data]. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2017, vol. 14, no. 6, pp. 56–72. (in Russ.) DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-56-72

13. Telnova N.O. [Revealing and Mapping Long-Term NDVI Trends for the Analysis of Climate Change Contribution to Agroecosystems' Productivity Dynamics in the Northern Eurasian Forest-Steppe and Steppe]. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2017, vol. 14, no. 6, pp. 97–107. (in Russ.) DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-97-107

14. Muzylev E.L., Startseva Z.P., Uspensky A.B. et al. [Using Remote Sensing Data to Model Water and Heat Regimes of Rural Territories]. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2017, vol. 14, no. 6, pp. 108–136. (in Russ.) DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-108-136

15. Khalil Z.H., Abdullaev S.M. [Diagnosis of Landscapes of the Province of Al-Diwaniyah (Iraq) by Using of Landsat-8 Multispectral Images]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*, 2018, vol. 7, no. 3, pp. 5–18. (in Russ.) DOI: 10.14529/cmse180301

16. Schiraldi N.J., Roundy P.E. The Evolution of Agricultural Drought Transition Periods in the U.S. Corn Belt. *Monthly Weather Review*, 2017, vol. 145, no. 2, pp. 451–472. DOI: 10.1175/MWR-D-16-0225.1

17. Sruthi S., Aslam M.A.M. Agricultural Drought Analysis Using the NDVI and Land Surface Temperature Data; a Case Study of Raichur District. *Aquatic Procedia*, 2015, vol. 4, pp. 1258–1264. DOI: 10.1016/j.aqpro.2015.02.164

18. Strashnaya A.I., Tarasova L.L., Bogomolova N.A. et al. [Prediction of Yield of Grain and Leguminous Crops in the Central Chernozem Areas Based on Aggregation of Terrestrial and Satellite Data]. *Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*, 2015, no. 353, pp. 128–153. (in Russ.)

19. Stankevich S.A., Piestova I.O. [Vegetation Cover Changes Mapping within Kiev Metropolis Agglomeration Using Long-Term Time Series of Landsat Multispectral Satellite Imagery]. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2014, vol. 11, no. 2, pp. 187–196. (in Russ.)

20. Bartholy J., Pongracz R., Dezso Z., Fricke C. Analysing the Urban Vegetation Effect Using Satellite Imagery for Budapest. *(ICUC9 – 9th) International Conference on Urban Climate Jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*, 2015, pp. 1–4.

21. Maxwell A.E., Warner T.A., Fang F. Implementation of Machine-Learning Classification in Remote Sensing: an Applied Review. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, vol. 39, no. 9, pp. 2784–2817. DOI: 10.1080/01431161.2018.1433343

22. Zhao Z., Gao J., Wang Y., Liu J., Li S. Exploring Spatially Variable Relationships between NDVI and Climatic Factors in a Transition Zone Using Geographically Weighted Regression. *Theoretical and Applied Climatology*, 2015, vol. 120, no. 3–4, pp. 507–519. DOI: 10.1007/s00704-014-1188-x

23. Sodnomov B.V., Alexander A.A., Tsydyrov B.Z., Garmaev E.Zh. [Algorithm of Assessment of Long-Term Variations of MODIS NDVI]. *Journal of Siberian Federal University. Series: Engineering & Technologies*, 2018, vol. 11, no. 1, pp. 61–68. (in Russ.) DOI: 10.17516/1999-494X-0009

24. Kataev M.Yu., Bekerov A.A., Shalda P.V. [Trend Analysis for Time Series of NDVI]. *Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 81–84. (in Russ.) DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-1-81-84

25. Zheng Y., Han J., Huang Y., Fassnacht S.R., Xie S., Lv E., Chen M. Vegetation Response to Climate Conditions Based on NDVI Simulations Using Stepwise Cluster Analysis for the Three-River

Headwaters Region of China. *Ecological Indicators*, September 2018, vol. 92, pp. 18–29. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.06.040

26. Stepchenko A., Chizhov J. NDVI Short-Term Forecasting Using Recurrent Neural Networks. *Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference, 2015. Environment. Technology. Resources, Rezekne, Latvia, 2015*, vol. III, pp. 180–185. DOI: 10.17770/etr2015vol3.167

27. Das M., Ghosh S.K. Deep-STEP: A Deep Learning Approach for Spatiotemporal Prediction of Remote Sensing Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016. vol. 13, no. 12, pp. 1984–1988. DOI: 10.1109/LGRS.2016.2619984

28. Nay J., Burchfield E., Gilligan J. A Machine-Learning Approach to Forecasting Remotely Sensed Vegetation Health. *J. of Remote Sensing*, 2018, vol. 39, no. 6, pp. 1800–1816. DOI: 10.1080/01431161.2017.1410296

29. Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V.K., Knutsson S., Laue J. Climate Change: The Uncertain Future of Tigris River Tributaries' Basins. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 2018, vol. 8, no. 3, pp. 75–93.

30. Nikolayev V.A. *Landshaftovedeniye: seminarakiye i prakticheskiye zanyatiya*. [Landscape Science: Seminars and Practical Classes]. Moscow, Moscow State Univ. Publ., 2006. 208 p.

31. Abdullaev S.M., Lenskaya O.Y., Gracheva I.V. [Classification and Assessment of Landscapes Condition in the Zone of Influence of the Projected South Ural Nuclear Electric Powerstation]. *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geography, Geoecology*, 2010, no. 2, pp. 60–65. (in Russ.)

32. GOST 17.8.1.02–88. *Okhrana prirody. Landshafty. Klassifikatsiya, Okhrana prirody* [State Standard 17.8.1.02–88. Nature Protection. Landscapes. Classification]. Moscow, IPK Publ. Standards, 2002.

33. UN-ESCWA and BGR (United Nations Economic and Social Commission for Western Asia; Bundesanstalt und Rohstoffe). *Inventory of Shared Water Resources in Western Asia*. Beirut, 2013.

34. Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), and U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA). *ASTER Global Digital Elevation Model [Data set]*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2009. DOI: 10.5067/ASTER/ASTGTM.002

35. Latham J., Cumani R., Rosati I., Bloise M. *Global Land Cover SHARE (GLC-SHARE) database Beta-Release Version 1.0*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy, 2014. pp. 1–39. (Available at <http://www.fao.org/uploads/media/glc-share-doc.pdf>)

36. Didan K. *MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006 [Data set]*. NASA EOSDIS LP DAAC, 2015. DOI: 10.5067/MODIS/MOD13Q1.006

37. Fensholt R., Proud S.R. Evaluation of Earth Observation Based Global Long-Term Vegetation Trends – Comparing GIMMS and MODIS Global NDVI Time Series. *Remote Sensing of Environment*, 2012, vol. 119, pp. 131–147. DOI: 10.1016/j.rse.2011.12.015

38. Jamali S., Seaquist J., Eklundh L., Ardö J. Automated Mapping of Vegetation Trends with Polynomials Using NDVI Imagery over the Sahel. *Remote Sens. of Environment*, 2014. vol. 141, pp. 79–89. DOI: 10.1016/j.rse.2013.10.019

39. Harris I.C., Jones P.D. *University of East Anglia Climatic Research Unit (CRU). CRU TS4.01: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 4.01 of High-Resolution Gridded Data of Month-by-Month Variation in Climate (Jan. 1901 – Dec. 2016)*. Centre for Environmental Data Analysis (CEDA), 2017. DOI: 10.1002/joc.3711

40. Willmott C.J., Matsuura K. *Terrestrial Air Temperature and Precipitation: Monthly and Annual Time Series (1900–2017). Version 5.01*. University of Delaware. Department of Geography, 2019. Available at: <http://climate.geog.udel.edu/~climate/>

41. Kislov A.V. *Klimatologiya* [Climatology]. Moscow, Academia Publ., 2011. 224 p.

42. Belda M., Holtanová E., Halenka T., Kalvová J. Climate Classification Revisited: From Köppen to Trewartha. *Climate Research*, 2014, vol. 59, no. 1, pp. 1–13. DOI: 10.3354/cr01204

43. Baker B., Diaz H., Hargrove W., Hoffman F. Use of the Köppen-Trewartha Climate Classification to Evaluate Climatic Refugia in Statistically Derived Ecoregions for the People's Republic of China. *Climatic Change*, 2010, vol. 98, no. 1–2, pp. 113–131. DOI: 10.1007/s10584-009-9622-2

44. Deo R.C., Şahin M. Application of the Artificial Neural Network Model for Prediction of Monthly Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index Using Hydrometeorological Parameters and Climate Indices in Eastern Australia. *Atmospheric Research*, 2015, vol. 161–162, pp. 65–81. DOI: 10.1016/j.atmosres.2015.03.018

45. Alhumaima A.S., Abdullaev S.M. Preliminary Assessment of Hydrothermal Risks in the Euphrates–Tigris Basin: Droughts in Iraq. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*, 2018, vol. 7, no. 4, pp. 41–58. DOI: 10.14529/cmse180403

46. Stathakis D. How Many Hidden Layers and Nodes? *J. of Remote Sensing*, 2009, vol. 30, no. 8, pp. 2133–2147. DOI: 10.1080/01431160802549278

47. Sheela K.Gnana, Deepa S.N. Review on Methods to Fix Number of Hidden Neurons in Neural Networks. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013. Article ID 425740, 11 p. DOI: 10.1155/2013/425740

Received 9 April 2019

УДК 004.8, 004.9, 910

DOI: 10.14529/ctcr190301

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА НОРМАЛИЗОВАННОГО ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА (NDVI) БИОКЛИМАТИЧЕСКИХ ЛАНДШАФТОВ БАСЕЙНА РЕКИ ДИЯЛА

А.С. Алхумайма, С.М. Абдуллаев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Данное исследование касается перспектив использования искусственных нейронных сетей для прогнозирования распределений Normalized Differential Vegetation Index (NDVI) в бассейне реки Дияла и главным образом того, каким образом информация о типах биоклиматических ландшафтов повлияет на прогнозируемость NDVI. Для этого в первом этапе эксперимента на вход перцептронов с одним скрытым слоем и различными функциями активации подавались только общегеографические характеристики одного из 25 000 участков бассейна размером $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ (широта и долгота, минимальная, средняя и максимальная высота над уровнем моря, тип земного покрова) и сезонные метеорологические факторы (сумма осадков и средние температуры, минимальные и максимальные температуры) и прогнозировалось значение NDVI в начале вегетационного периода. Все 20 перцептронов с 4–20 скрытыми узлами обучались на данных 2000–2010 гг. с помощью алгоритма обратного распространения ошибки и тестировались на данных за 2011–2016 гг. Было показано, что лучшее соответствие между прогнозируемым и фактическими NDVI с коэффициентом детерминации (КД), равным 0,78, достигается перцептроном с логистической функцией активации 12 скрытых нейронов и гиперболической тангенциальной активацией выходного нейрона. При этом обнаружена пространственная неоднородность качества прогноза: в верховьях реки, характеризующихся согласно Кеппену – Треварту, как ландшафты умеренного горного климата и субтропического климата с сухим летом, КД = 0,76–0,80, тогда как в сухих степных ландшафтах и полупустынных ландшафтах низовой реки КД = 0,59–0,66. Эксперименты с 20 моделями с добавлением типа ландшафтов на вход перцептронов показали возможное улучшение КД на 5 %, а индивидуальный подбор модели перцептронов для каждого ландшафта (всего 150 моделей) позволил увеличить КД до 0,73–0,85. Тем не менее сильное отличие характеристик индивидуальных моделей осложняет перспективы их использования в практических целях и требует поиска новых подходов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, прогноз NDVI, перцептрон, биоклиматические ландшафты, гидротермический режим, вегетационный период.

Литература

1. Tucker, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation / C.J. Tucker // *Remote Sensing of Environment*. – 1979. – Vol. 8, no. 2. – P. 127–150.

2. *Sensitivity of Climate to Changes in NDVI* / L. Bounoua, G.J. Collatz, S.O. Los et al. // *Journal of Climate*. – 2000. – Vol. 13, no. 13. – P. 2277–2292. DOI: 10.1175/1520-0442(2000)013<2277:SOCTCI>2.0.CO;2

3. *Spatial relationship between climatologies and changes in global vegetation activity* / R. de Jong, M.E. Schaepman, R. Furrer et al. // *Global Change Biology*. – 2013. – Vol. 19, no. 6. – P. 1953–1964. DOI: 10.1111/gcb.12193

4. *Ground- and satellite-based evidence of the biophysical mechanisms behind the greening Sahel* / M. Brandt, Ch. Mbow, A.A. Diouf et al. // *Global Change Biology*. – 2015. – Vol. 21, no. 4. – P. 1610–1620. DOI: 10.1111/gcb.12807

5. *MODIS EVI-based net primary production in the Sahel 2000–2014* / J. Ardöa, T. Tagesson, J. Sadegh, A. Khatir // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2018. – Vol. 65. – P. 35–45. DOI: 10.1016/j.jag.2017.10.002

6. *Potential impacts of climate change on vegetation dynamics in Central Asia* / Zhi Li, Yaning Chen, Weihong Li et al. // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2015. – Vol. 120. – P. 12345–12356. DOI: 10.1002/2015JD023618

7. *Assessment of Desertification Risk in Central Asia and Kazakhstan Using NOAA AVHRR NDVI and Precipitation Data* / P.A. Propastin, M. Kappas, S. Erasmi, N.R. Muratova // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2007. – Т. 4, № 2. – С. 304–313.

8. *Spatio-temporal characteristics of vegetation cover of arid and semiarid climatic zones in Mongolia on the basis of vegetation index NDVI* / A.K. Tulokhonov, B.Z. Tsydypov, A.L. Voloshin et al. // *Arid Ecosystems*. – 2014. – Vol. 4, no. 2. – P. 61–68. DOI: 10.1134/S2079096114020115

9. *Xu, Y. NDVI-based vegetation responses to climate change in an arid area of China* / Y. Xu, J. Yang, Y. Chen // *Theoretical and Applied Climatology*. – October 2016. – Vol. 126, no. 1–2. – P. 213–222. DOI: 10.1007/s00704-015-1572-1

10. *Chu, D. Sensitivity of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Seasonal and Interannual Climate Conditions in the Lhasa Area, Tibetan Plateau, China* / D. Chu, L. Lu, T. Zhang // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. – 2007. – Vol. 39, no. 4. – P. 635–641. DOI: 10.1657/1523-0430(07-501)[CHU]2.0.CO;2

11. *Использование данных NOAA-AVHRR для выявления многолетней динамики растительности Северной Евразии* / М.А. Медведева, И.Ю. Савин, С.А. Барталев, Е.А. Лупян // *Исследование Земли из космоса*. – 2011. – № 4. – С. 55–62.

12. *Елсаков, В.В. Пространственная и межгодовая неоднородность изменений растительного покрова тундровой зоны Евразии по материалам съёмки MODIS 2000–2016 гг.* / В.В. Елсаков // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2017. – Т. 14, № 6. – С. 56–72. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-56-72

13. *Тельнова, Н.О. Выявление и картографирование многолетних трендов NDVI для оценки вклада изменений климата в динамику биологической продуктивности агроэкосистем лесостепной и степной зон Северной Евразии* / Н.О. Тельнова // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2017. – Т. 14, № 6. – С. 97–107. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-97-107

14. *Использование данных дистанционного зондирования при моделировании водного и теплового режимов сельских территорий* / Е.Л. Музылев, З.П. Старцева, А.Б. Успенский и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2017. – Т. 14, № 6. – С. 108–136. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-108-136

15. *Халил, З.Х. Диагностика ландшафтов провинции Эль-Дивания (Ирак) по мультиспектральным снимкам Landsat-8* / З.Х. Халил, С.М. Абдуллаев // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика»*. – 2018. – Т. 7, № 3. – С. 5–18. DOI: 10.14529/cmse180301

16. *Schiraldi, N.J. The Evolution of Agricultural Drought Transition Periods in the U.S. Corn Belt* / N.J. Schiraldi, P.E. Roundy // *Monthly Weather Review*. – 2017. – Vol. 145, no. 2. – P. 451–472. DOI: 10.1175/MWR-D-16-0225.1

17. *Sruthi, S. Agricultural Drought Analysis Using the NDVI and Land Surface Temperature Data; a Case Study of Raichur District* / S. Sruthi, M.A.M. Aslam // *Aquatic Procedia*. – 2015. – Vol. 4. – P. 1258–1264. DOI: 10.1016/j.aapro.2015.02.164

18. *Прогнозирование урожайности зерновых и зернобобовых культур в Центральном Черноземных областях на основе комплексирования наземных и спутниковых данных* / А.И. Страшная,

Л.Л. Тарасова, Н.А. Богомолова и др. // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2015. – № 353. – С. 128–153.

19. Станкевич, С.А. Картирование изменений растительного покрова Киевской агломерации на основе долговременных временных рядов многоспектральных космических снимков Landsat / С.А. Станкевич, И.А. Пестова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11, № 2. – С. 187–196.

20. *Analysing the urban vegetation effect using satellite imagery for Budapest* / J. Bartholy, R. Pongracz, Z. Dezso, C. Fricke // (ICUC9 – 9th) International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment. – 2015. – P. 1–4.

21. Maxwell, A.E. Implementation of machine-learning classification in remote sensing: an applied review / A.E. Maxwell, T.A. Warner, F. Fang // International Journal of Remote Sensing. – 2018. – Vol. 39, no. 9. – P. 2784–2817. DOI: 10.1080/01431161.2018.1433343

22. *Exploring spatially variable relationships between NDVI and climatic factors in a transition zone using geographically weighted regression* / Zhiqiang Zhao, Jiangbo Gao, Yanglin Wang et al. // Theoretical and Applied Climatology. – 2015. – Vol. 120, no. 3–4. – P. 507–519. DOI: 10.1007/s00704-014-1188-x

23. Алгоритм оценки долговременных вариаций MODIS NDVI / Б.В. Содномов, А.А. Аюржанов, Б.З. Цыдыпов, Е.Ж. Гармаев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 61–68 DOI: 10.17516/1999-494X-0009

24. Катаев, М.Ю. Анализ трендов временных рядов вегетационного индекса NDVI / М.Ю. Катаев, А.А. Бекеров, П.В. Шалда // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 81–84. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-1-81-84

25. *Vegetation response to climate conditions based on NDVI simulations using stepwise cluster analysis for the Three-River Headwaters region of China* / Y. Zheng, J. Han, Y. Huang et al. // Ecological Indicators. – 2018. – Vol. 92. – P. 18–29. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.06.040

26. Stepchenko, A. NDVI Short-Term Forecasting Using Recurrent Neural Networks / A. Stepchenko, J. Chizhov // Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference, 2015. Environment. Technology. Resources, Rezekne, Latvia. – 2015. – Vol. III. – P. 180–185. DOI: 10.17770/etr2015vol3.167

27. Das, M. Deep-STEP: A Deep Learning Approach for Spatiotemporal Prediction of Remote Sensing Data / M. Das, S.K. Ghosh // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2016. – Vol. 13, no. 12. – P. 1984–1988. DOI: 10.1109/LGRS.2016.2619984

28. Nay, J. A machine-learning approach to forecasting remotely sensed vegetation health / J. Nay, E. Burchfield, J. Gilligan // International Journal of Remote Sensing. – 2018. – Vol. 39, no. 6. – P. 1800–1816. DOI: 10.1080/01431161.2017.1410296

29. *Climate Change: The Uncertain Future of Tigris River Tributaries' Basins* / N. Adamo, N. Al-Ansari, V.K. Sissakian et al. // Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering. – 2018. – Vol. 8, no. 3. – P. 75–93.

30. Николаев, В.А. Ландшафтоведение: семинарские и практические занятия / В.А. Николаев. – 2-е изд. – М.: Географический фак. МГУ, 2006. – 208 с.

31. Абдуллаев, С.М. Классификация и оценка состояния ландшафтов в зоне влияния проектируемой Южно-Уральской АЭС / С.М. Абдуллаев, О.Ю. Ленская, И.В. Грачева // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геоэкология и география. – 2010. – № 2. – С. 60–65.

32. ГОСТ 17.8.1.02–88. Охрана природы. Ландшафты. Классификация, Охрана природы. Nature protection. Landscapes. Classification. Сб. ГОСТов. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002.

33. UN-ESCWA and BGR (United Nations Economic and Social Commission for Western Asia; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), Inventory of Shared Water Resources in Western Asia. Beirut, 2013.

34. Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), and U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA). ASTER Global Digital Elevation Model [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2009. DOI: 10.5067/ASTER/ASTGTM.002

35. Global Land Cover SHARE (GLC-SHARE) database Beta-Release Version 1.0 / J. Latham, R. Cumani, I. Rosati, M. Bloise. – Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy, 2014. – P. 1–39. – <http://www.fao.org/uploads/media/glc-share-doc.pdf>.

36. Didan, K. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006 [Data set] / K. Didan. – NASA EOSDIS LP DAAC, 2015. DOI: 10.5067/MODIS/MOD13Q1.006
37. Harris, I.C. University of East Anglia Climatic Research Unit (CRU). CRU TS4.01: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4.01 of high-resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901 – Dec. 2016) / I.C. Harris, P.D. Jones. – Centre for Environmental Data Analysis (CEDA), 2017. DOI: 10.1002/joc.3711
38. Willmott, C.J. Terrestrial Air Temperature and Precipitation: Monthly and Annual Time Series (1900 – 2017). Version 5.01 / C.J. Willmott, K. Matsuura. – University of Delaware. Department of Geography, 2019. – <http://climate.geog.udel.edu/~climate/>
39. Fensholt, R. Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends – Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series / R. Fensholt, S.R. Proud // *Remote Sensing of Environment*. – 2012. – Vol. 119. – P. 131–147. DOI: 10.1016/j.rse.2011.12.015
40. Automated mapping of vegetation trends with polynomials using NDVI imagery over the Sahel / S. Jamali, J. Seaquist, L. Eklundh, J. Ardö // *Remote Sensing of Environment*. – 2014. – Vol. 141. – P. 79–89. DOI: 10.1016/j.rse.2013.10.019
41. Кислов, А.В. Климатология / А.В. Кислов. – М.: Академия, 2011. – 224 с.
42. Climate classification revisited: From Köppen to Trewartha / M. Belda, E. Holtanová, T. Halenka, J. Kalvová // *Climate Research*. – 2014. – Vol. 59, no. 1. – P. 1–13. DOI: 10.3354/cr01204
43. Use of the Köppen – Trewartha climate classification to evaluate climatic refugia in statistically derived ecoregions for the People’s Republic of China / B. Baker, H. Diaz, W. Hargrove, F. Hoffman // *Climatic Change*. – 2010. – Vol. 98, no. 1–2. – P. 113–131. DOI: 10.1007/s10584-009-9622-2
44. Deo, R.C. Application of the Artificial Neural Network model for prediction of monthly Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index using hydrometeorological parameters and climate indices in eastern Australia / R.C. Deo, M. Şahin // *Atmospheric Research*. – 2015. – Vol. 161–162. – P. 65–81. DOI: 10.1016/j.atmosres.2015.03.018
45. Alhumaima, A.S. Preliminary Assessment of Hydrothermal Risks in the Euphrates–Tigris Basin: Droughts in Iraq / A.S. Alhumaima, S.M. Abdullaev // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика»*. – 2018. – Т. 7, № 4. – С. 41–58. DOI: 10.14529/cmse180403
46. Stathakis, D. How many hidden layers and nodes? / D. Stathakis // *J. of Remote Sensing*. – 2009. – Vol. 30, no. 8. – P. 2133–2147. DOI: 10.1080/01431160802549278
47. Sheela, K.G. Review on Methods to Fix Number of Hidden Neurons in Neural Networks / K.G. Sheela, S.N. Deepa // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2013. Article ID 425740, 11 p. DOI: 10.1155/2013/425740

Алхумайма Али Субхи, аспирант кафедры системного программирования, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; engineer_alisubhi@yahoo.com.

Абдуллаев Санжар Муталович, д-р геогр. наук, профессор кафедры системного программирования, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; abdullaevsm@susu.ru.

Поступила в редакцию 9 апреля 2019 г.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Alhumaima, A.S. Landscape Approach to Normalized Difference Vegetation Index Forecast by Artificial Neural Network: Example of Diyala River Basin / A.S. Alhumaima, S.M. Abdullaev // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 5–19. DOI: 10.14529/ctcr190301

FOR CITATION

Alhumaima A.S., Abdullaev S.M. Landscape Approach to Normalized Difference Vegetation Index Forecast by Artificial Neural Network: Example of Diyala River Basin. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 5–19. DOI: 10.14529/ctcr190301

РАЗРАБОТКА ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРИХВАТОВ КОЛОНН БУРИЛЬНЫХ ТРУБ

Ш.Ш. Кодиров, А.Л. Шестаков

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Прихват колонны бурильных труб является одним из самых тяжелых видов аварий в бурении нефтяных и газовых скважин и оказывает существенное влияние на эффективность процесса бурения и стоимость скважины. Прогнозирование прихвата на стадии проектирования и в процессе бурения скважин позволяет минимизировать риск возникновения прихвата за счет выбора оптимального способа предупреждения для конкретных геолого-технических условий.

Статья посвящена разработке искусственной нейронной сети для прогнозирования прихвата колонны бурильных труб. Также приведен литературный обзор существующих методов прогнозирования прихватов. В качестве входных данных применяются важные и обобщающие факторы, влияющие на возникновение всех видов прихватов, что позволяет прогнозировать все виды прихватов колонн бурильных труб. С целью повышения восприимчивости входных данных к обучению нейронной сети производится преобразование элементов данных на субэлементы с последующей нормализацией. Экспериментальным методом выбирается тип и архитектура сети, а также ее гиперпараметры. Оценка качества работы сети производится методом кросс-валидации по k -блокам. Для нахождения оптимальной комбинации активационных функций с различными оптимизаторами проводятся экспериментальные исследования с дальнейшим анализом результатов.

Эксперименты реализованы на языке программирования Python с пакетами библиотек KERAS, TensorFlow и Matplotlib, а также в облачной платформе Colaboratory от компании Google.

Отличительной особенностью предлагаемого метода является то, что полученная модель прогнозирования легко может адаптироваться к новым данным, что часто происходит при бурении скважин на новых месторождениях.

Ключевые слова: прихват колонн бурильных труб, распознавание и прогнозирование, нейронные сети, многослойный перцептрон, нормализация данных, кросс-валидация по k -блокам.

Введение

Бурение скважин для разведки и разработки новых месторождений, а также добычи углеводородных ресурсов всегда было и остается чрезвычайно капиталоемким для нефтегазодобывающих организаций. Получение высоких технико-экономических показателей бурения во многом зависит от успешности преодоления осложнений и аварий. При этом риск возникновения аварий в современных условиях бурения нефтяных и газовых скважин (разнообразие геологического строения районов, глубина скважин, высокие давления, температура и солевая агрессия, наличие неустойчивых пород, сложность конструкций и конфигураций скважин) очень высок.

Наиболее распространенным и трудоемким видом аварий в процессе бурения скважин является прихват бурильной колонны, поэтому вопросам прогнозирования и идентификаций прихватов колонн бурильных труб отводится первостепенная роль.

Прихват – это непредвиденный процесс при сооружении скважин, характеризующийся потерей подвижности колонны труб или скважинных приборов при приложении к ним максимально допустимых нагрузок с учетом запаса прочности труб и применяемого оборудования [1]. Время простоя при ликвидации прихватов приводит к значительным финансовым убыткам. Следовательно, разработка методов прогнозирования и распознавания прихватов позволит получить значительную экономическую выгоду за счет сокращения времени на их ликвидацию [1–14].

В 70–80-е гг. XX в. коллективом ученых – А.К. Самогоем, А.Г. Аветисовым, Н.Н. Кошелевым, Н.Г. Аветисяном, М.М. Ахмадуллиным, С.Р. Хлебниковым – впервые была разработана процедура распознавания, прогнозирования и предупреждения прихватов колонн статистическими методами, а именно методом последовательной диагностической процедуры [1–6]. Данный метод авторы использовали для прогнозирования возникновения трех типов прихватов на основе промысловых данных. Авторы утверждают, что достоверность прогнозирования этого метода высокая (с вероятностью от 0,7 и более). Следует отметить, что такой подход требует значительного времени на проведение процедуры прогнозирования и получение больших статистических данных о прихватах. Следовательно, применение данного метода ограничено, особенно в геологически неразведанных районах.

Исследователем Ф.Н. Абу-Абед предложен метод обнаружения предаварийных ситуаций в процессе промышленного бурения нефтяных скважин [8–14]. В работах автора применяется кластеризация данных и последующее прогнозирование на основе нейронных сетей. В качестве входного набора данных автором использованы статистические данные об авариях, источник данных – библиотека программного обеспечения станции геолого-технологического исследования. В качестве выходного сигнала использованы два состояния текущей ситуации: «штатная ситуация» и «предаварийная ситуация». Работа автора охватывает все возможные виды аварий и некоторые осложнения в целом (газонефтеводопроявление и выбросы, поглощения бурового и тампонажного раствора, прихват бурового инструмента, обвал стенок скважины) без детализации причин их возникновения. Такой подход не позволяет оценить влияние конкретных факторов на развитие того или иного вида аварии, следовательно, устранение аварийных ситуаций на ранних стадиях становится невозможным.

Американскими учеными Хьюстонского университета и компании Халлибертон (A. Murillo, J. Neuman, R. Samuel) предлагается прогнозирование дифференциального и механического прихватов бурильных труб методами нечеткой логики и нейронной сети в сочетании с моделью дискриминантного анализа [15]. Исследование проведено на основе полевых производственных данных Халлибертон. В качестве входных данных были использованы параметры режимов бурения, глубина скважины, момент вращения, давление на стояке бурового насоса, диаметр долота, геометрия компоновки низа бурильной колонны и параметры бурового раствора, в том числе реологические. В результате полученная модель имеет достаточно высокую точность прогнозирования. Несмотря на то, что работа в большей степени посвящена дифференциальному прихвату труб, авторы не учитывали в своей модели типы горных пород. Однако именно данный фактор в большей степени влияет на природу возникновения дифференциального прихвата [1, 7].

Совместно с американскими и иранскими учеными (N.M. Elahi, P. Ezzatyar, J. Saeid) предлагается прогнозирование дифференциального прихвата бурильных труб методом нечеткой логики и активного обучения [16]. В качестве входных элементов данных применяются следующие факторы: глубина скважины, предел текучести бурового раствора (БР), тип БР, статическое напряжение сдвига при 1 и 10 мин покоя, тип смазочных добавок, содержание твердых частиц, водоотдача БР, толщина фильтрационной корки, пластическая вязкость, осевая нагрузка на долото и частота вращения инструмента. Авторы утверждают, что полученная ими модель по сравнению с существующими моделями [15] имеет высокую точность прогнозирования возникновения дифференциального прихвата. Несомненная важность этой работы состоит в том, что в ней применяется нормализация входных данных, за счет чего повышается точность модели. Однако в работе также не учитываются типы горных пород в качестве входных данных.

Таким образом, при наличии существенного задела по диагностике прихватов колонн бурильных труб многие свойства и механизмы возникновения прихватов недостаточно изучены. В данной работе представлен новый метод прогнозирования прихватов колонн бурильных труб на основе искусственной нейронной сети, при разработке которой были учтены наиболее важные факторы, влияющие на возникновение прихватов.

1. Подготовка данных

1.1. Выбор и преобразование набора входных данных

Успешное обнаружение и прогнозирование прихватов колонн бурильных труб возможно только при тщательном анализе комбинаций факторов, степень влияния которых разными исследователями определяется субъективно [1–7].

В качестве набора данных о прихватах в работе были использованы промышленные архивные данные ВНИИКРнефти по 92 прихватам скважин [1–6].

Рассматриваемые данные представляют собой следующие компоненты вектора состояния скважины ($X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}, X_{17}, X_{18}$), где

X_1 – глубина, на которой находится долото в момент прихвата, м;

X_2 – тип породы в зоне прихвата;

X_3 – пластовое давление в зоне прихвата, кгс/см²;

X_4 – разность между давлением столба промывочной жидкости и пластовым давлением, кгс/см²;

X_5 – плотность бурового раствора, г/см³;

X_6 – условная вязкость, с;

X_7 – СНС₁, мгс/см²;

X_8 – СНС₁₀, мгс/см²;

X_9 – водоотдача бурового раствора, см³/30 мин;

X_{10} – длина УБТ, м;

X_{11} – зазор между стенкой скважины и УБТ, мм;

X_{12} – угол искривления ствола скважины, градус;

X_{13} – температура на глубине прихвата, °С;

X_{14} – количество нефти в растворе, %;

X_{15} – понизители вязкости;

X_{16} – понизители водоотдачи;

X_{17} – ингибирующие добавки;

X_{18} – смазочные добавки.

Перечень компонентов вектора состояния скважины довольно представительен и при этом не противоречит набору априорных факторов, оказывающих первостепенное влияние на возникновение прихватов [2].

Для повышения информативности исходного вектора состояния ряд элементов вектора ($X_2, X_{15}, X_{16}, X_{17}, X_{18}$) был разделен на субэлементы. Каждому субэлементу данных было присвоено долевое значение в соответствии своего основного элемента данных (см. таблицу). Такое разделение позволило повысить репрезентативность выборки для нейронной сети (НС) и в дальнейшем улучшить качество ее работы.

Разделение элементов данных на субэлементы

X_2				X_{15}				X_{16}					X_{17}			X_{18}		
$X_{2.1}$	$X_{2.2}$	$X_{2.3}$	$X_{2.4}$	$X_{15.1}$	$X_{15.2}$	$X_{15.3}$	$X_{15.4}$	$X_{16.1}$	$X_{16.2}$	$X_{16.3}$	$X_{16.4}$	$X_{17.1}$	$X_{17.2}$	$X_{17.3}$	$X_{17.4}$	$X_{18.1}$	$X_{18.2}$	$X_{18.3}$
Тип породы в зоне прихвата. Глина, %	Тип породы в зоне прихвата. Аргиллит, %	Тип породы в зоне прихвата. Песчаник, %	Тип породы в зоне прихвата. Соль, %	Понизитель вязкости. ФХЛС, %	Понизитель вязкости. ТПФН, %	Понизитель вязкости. Окзил, %	Понизитель вязкости. УЦР, %	Понизитель водоотдачи. КССБ, %	Понизитель водоотдачи. Гипан, %	Понизитель водоотдачи. КМЦ, %	Понизитель водоотдачи. УЦР, %	Ингибирующие добавки. Мел, %	Ингибирующие добавки. Ж. стекло, %	Ингибирующие добавки. Соль, %	Ингибирующие добавки. Известь, %	Смазывающие добавки. Нефть, %	Смазывающие добавки. Графит, %	Смазывающие добавки. СМАД, %

Таким образом, имеются 32 компоненты вектора состояния, которые в наибольшей степени характеризуют состояние колонны бурильных труб, находящихся в стволе скважины. В качестве выходной информации о прихвате рассматривается 3 состояния: **I** – прихват под действием перепада давления; **II** – прихват (заклинивание) инструмента при его движении в скважине; **III** – прихват вследствие сужения сечения ствола скважины (в результате оседания шлама, утяжелителя, осыпей, обвалов, выпучивания пород, сальникообразования и т. п.).

1.2. Обучающие, проверочные и тестовые наборы данных

Оценка модели всегда сводится к делению доступных данных на три набора: *обучающий*, *проверочный* и *тестовый*. Модель будет обучаться на обучающих данных, а проверка качества обучения будет оцениваться на проверочных. После завершения обучения модель будет тестироваться с применением тестовых данных. Такой подход позволяет получить наиболее точную оценку обобщенности модели [17].

1.3. Нормализация данных

НС плохо работает со значениями элементов данных, имеющих самые разные диапазоны. Например, в нашем случае глубина нахождения долота – от 50 до 6000 м, плотность бурового раствора – от 0,890 до 1,80 г/см³ и т. д. Сеть сможет автоматически адаптироваться к таким разнородным данным, но это усложнит процесс обучения. На практике к таким данным принято применять нормализацию.

Нормализация – это ряд методов, стремящихся сделать сходство разных образцов более заметным для модели машинного обучения, что помогает модели выделять и обобщать новые данные. Для данной задачи подходит наиболее распространенная форма нормализации, которая предполагает нормальность закона распределения данных. Суть нормализации состоит в центрировании данных и приведении их к единичной дисперсии:

$$X_{\text{норм}i} = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma},$$

где \bar{X} – среднее значение по признаку X_i (элемента данных), σ – среднеквадратическое отклонение.

Важно отметить, что нормализации подвергаются обучающие и проверочные данные. Тестовые данные не должны подвергаться нормализации [17].

2. Подготовка НС

2.1. Тип и архитектура НС

Существуют различные типы и модели искусственных НС, которые различаются по принимаемым видам входной информации (графической, звуковой, текстовой, цифровой и т. д.), а также методам их обработки [19].

В математическом виде функционирование нейрона k можно описать следующей парой уравнений:

$$u_k = \sum_{m=1}^m w_{km} x_m, Y_k = \varphi(u_k + b_k),$$

где x_1, x_2, \dots, x_m – входные сигналы; $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$ – синаптические веса нейрона k ; u_k – линейная комбинация входных воздействий; b_k – порог; $\varphi(\cdot)$ – функция активации; Y_k – выходной сигнал нейрона.

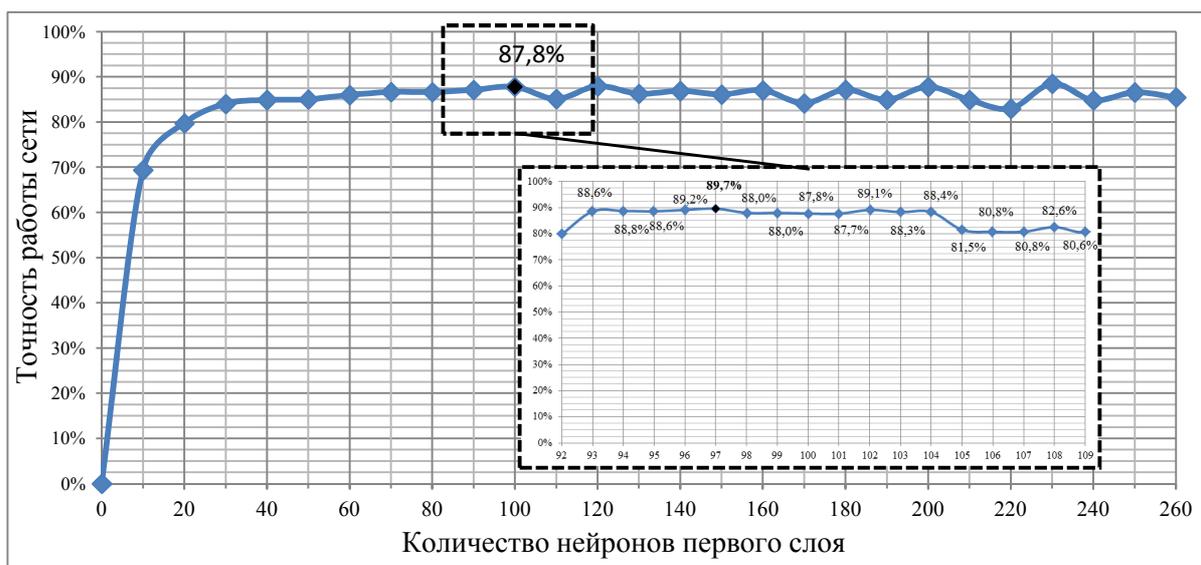
Опираясь на существующие теории и результаты практического применения различных структур и моделей НС, для решения поставленной задачи была выбрана многослойная сеть с последовательными слоями (l_1, l_2, l_3) и полными связями между ними (модель *Sequential* или многослойный персептрон) [17–23].

Основным строительным блоком НС является *слой* (l_n). Существуют различные методики и рекомендации по расчету количества слоев, но на практике этот параметр обычно для каждой задачи выбирается индивидуально на основе численных экспериментов.

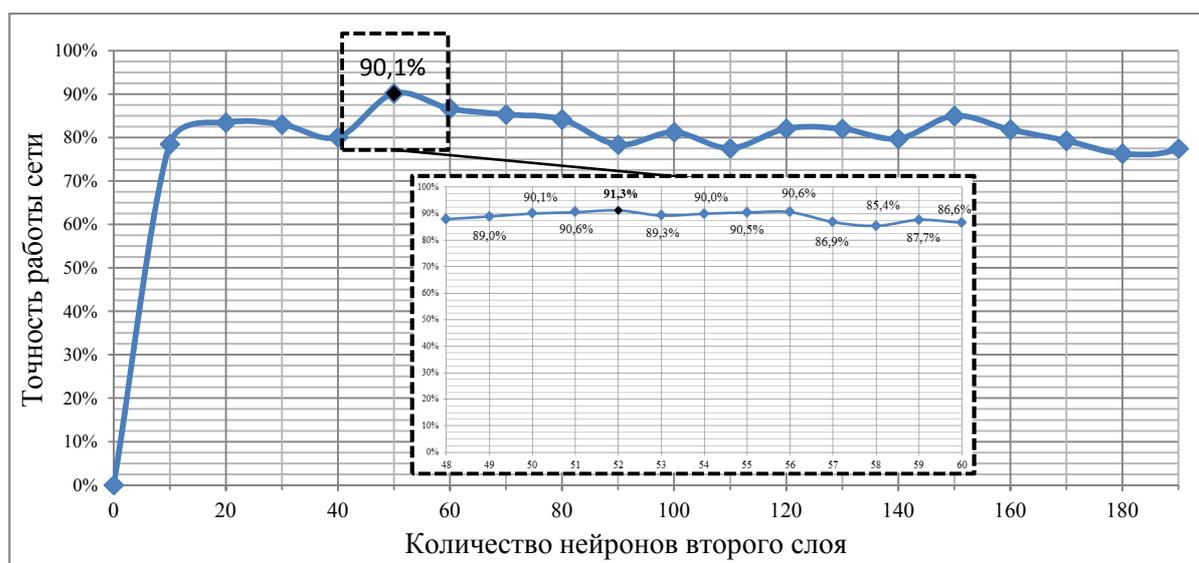
В качестве исходной архитектуры была выбрана следующая структура: сеть с входным слоем из 32 нейронов с функцией активации «ReLU» и с выходным слоем из 3 нейронов с функцией активации «SoftMax».

Информатика и вычислительная техника

Далее был проведен ряд экспериментов, в которых оценивалось качество работы сети при изменении количества нейронов входного слоя. Результаты эксперимента (рис. 1а) показали, что увеличение количества нейронов входного слоя до 100 приводит к максимальной точности работы сети, а последующее увеличение приводит к нестабильному улучшению точности. С целью нахождения более точного количества нейронов в этом слое проведены повторные эксперименты в диапазоне от 92 до 108 нейронов с шагом один нейрон. Результаты эксперимента показали, что при количестве нейронов 97 точность работы сети достигает максимума (см. рис. 1а), следовательно, для выбранной сети оптимальное количество нейронов в первом слое составляет 97. Таким образом, эта процедура проведена для второго слоя (рис. 1б) и определено оптимальное количество нейронов 52. Дальнейшие увеличения количества слоев и нейронов в этих слоях не приводит к повышению точности работы сети.



а)



б)

Рис. 1. График точности работы сети в зависимости от количества нейронов в первом (а) и во втором (б) слое

Исходя из вышесказанного, обоснованно выбрана следующая архитектура сети: трехслойная сеть, где первый слой состоит из 97 нейронов, второй из 52 и последний третий (выходной) слой состоит из 3 нейронов. Во 2-м слое применяется активационная функция «*Sigmoid*», следовательно, на выходном слое применяется активационная функция мягкого максимума «*SoftMax*» (рис. 2).

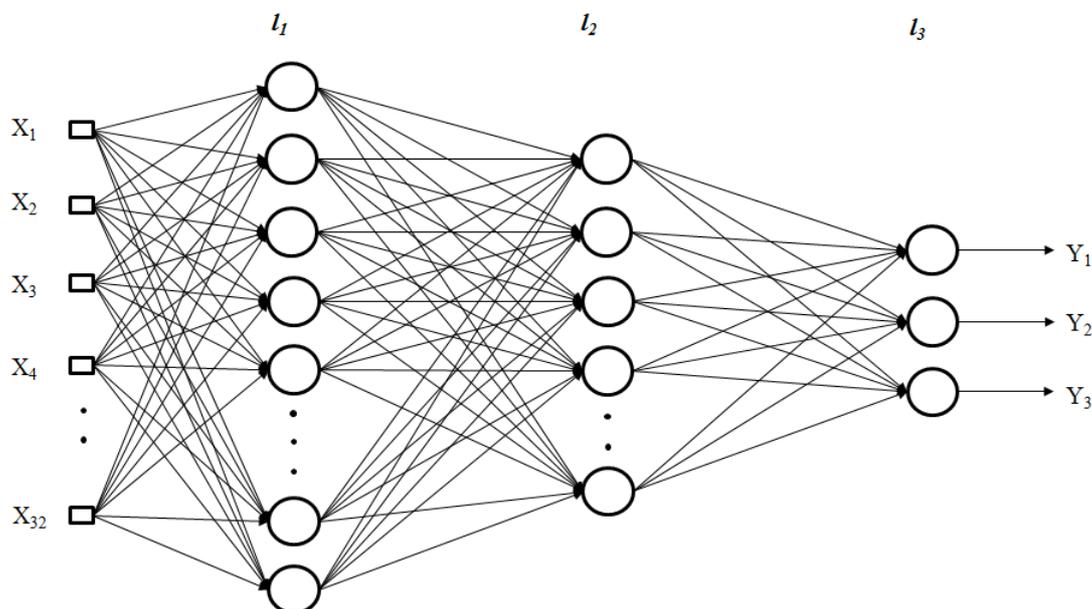


Рис. 2. Архитектура НС. Многослойная сеть с последовательными связями

Функция активации ограничивает амплитуду выходного сигнала нейрона. Эта функция также называется функцией сжатия. Такая комбинация активационных функций выбрана исходя из результатов проведенных экспериментов, которые рассмотрены в разделе «оценка качества работы сети».

2.2. Алгоритм и метод обучения сети

Обучение НС – это процесс, в котором параметры НС настраиваются посредством моделирования среды, в которую эта сеть встроена. Существуют различные алгоритмы и методы обучения НС, в зависимости от архитектуры сети и постановки решаемой задачи. Так как модель рассматриваемой сети – это многослойный персептрон, то целесообразно применять алгоритм обучения сети с учителем и методом обратного распространения ошибки (со стохастическим градиентным спуском) [17–23].

Для подготовки сети к обучению прежде всего необходимо настроить три параметра для этапа компиляции:

1. *Функцию потерь* – величину, которую требуется свести к минимуму в ходе обучения, поэтому она должна представлять собой меру успеха для решаемой нами задачи. По своим назначениям существует множество видов функции потерь. В задачах мультиклассовой классификации (прогнозирования) целесообразно применять категориальную перекрестную энтропию (*Categorical cross-entropy*), которая описывается уравнением:

$$L_{ccek} = - \sum_{k=1}^n Y_k \log(\hat{Y}_k),$$

где \hat{Y}_k – предсказанное моделью значение целевой переменной; Y_k – желаемое значение целевой переменной.

2. *Оптимизатор* – механизм, с помощью которого сеть будет обновлять себя, опираясь на наблюдаемые данные и функцию потерь. Оптимизатор также определяет точный способ использования градиента потерь для изменения параметров (рис. 3). Применительно для нашей задачи наилучшие результаты были получены при выборе оптимизатора «*Adam*», реализующего градиентный спуск с импульсом.

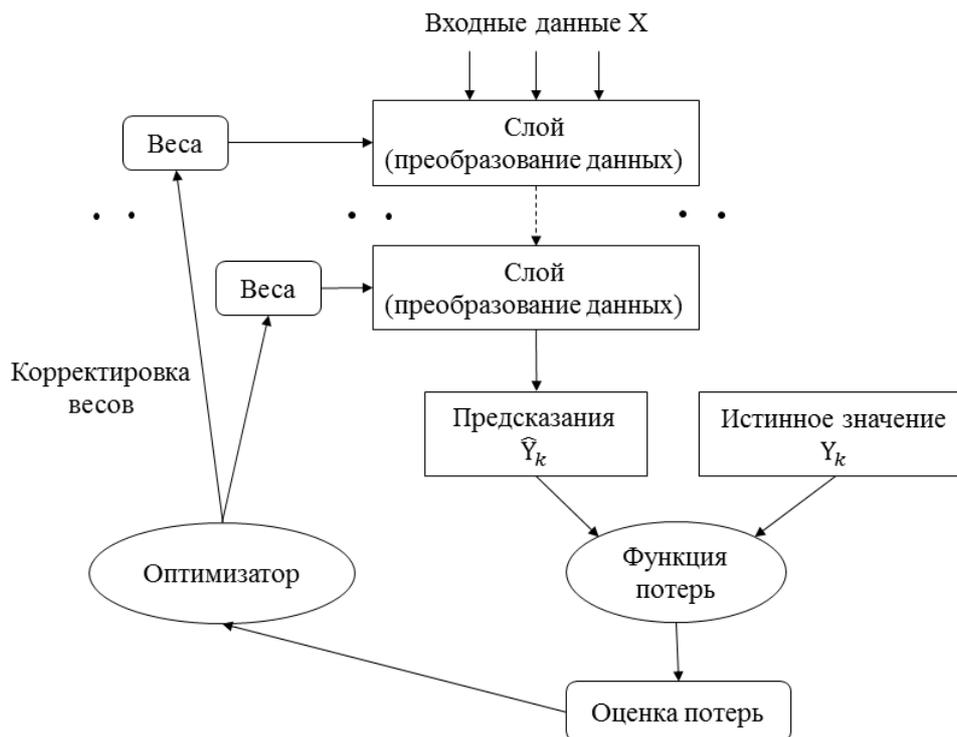


Рис. 3. Блок-схема процесса обучения сети [19]

3. Метрику для мониторинга на этапах обучения и тестирования мы выбрали «Accuracy» – это одна из удобных метрик качества моделей машинного обучения.

$$\text{Accuracy (точность)} = \frac{\text{Количество верных ответов}}{\text{Общее количество ответов}}$$

Она часто используется для классификации и показывает долю данных, для которых класс был определен правильно.

2.3. Настройка гиперпараметров сети

Интуитивно гиперпараметры можно представить как параметры, которые не были извлечены из данных и являются рычагами управления моделью, т. е. параметры, которые можно изменять с целью улучшения качества работы модели. Под гиперпараметрами следует понимать: размер мини-выборки, количество нейронов входного слоя, количество скрытых слоев НС и количество эпох обучения. Оптимальная настройка гиперпараметров может быть достигнута только в результате проведения серии экспериментов, в каждом из которых необходимо менять один из гиперпараметров и анализировать изменение качества работы сети. Первоначально эти параметры выбираются произвольно. Для используемой сети числом эпох обучения было выбрано 150. Но вскоре после проведения экспериментов и анализа результатов был отмечен следующий факт: по мере прохождения эпох обучения уменьшается доля ошибки на обучающей и проверочной выборке (рис. 4а). По мере увеличения эпох доля ошибки на проверочных данных в отличие от доли ошибок на обучающих данных достигает определенного уровня (минимума), после которого по мере увеличения эпохи начинает увеличиваться ошибка (происходит переобучение сети). В таком случае необходимо остановить процесс обучения на той эпохе, после которой замечено увеличение ошибок обучения сети. Судя по графику (см. рис. 4а) оптимальное число эпох для полного цикла обучения сети составляет 50, что подтверждается результатами повторного обучения (рис. 4б).

В результате проведенной серии экспериментов наилучшие результаты работы сети получены при следующих гиперпараметрах: размер мини-выборки 1; 97 нейронов входного слоя; 1 скрытый слой НС; 50 эпох обучения.

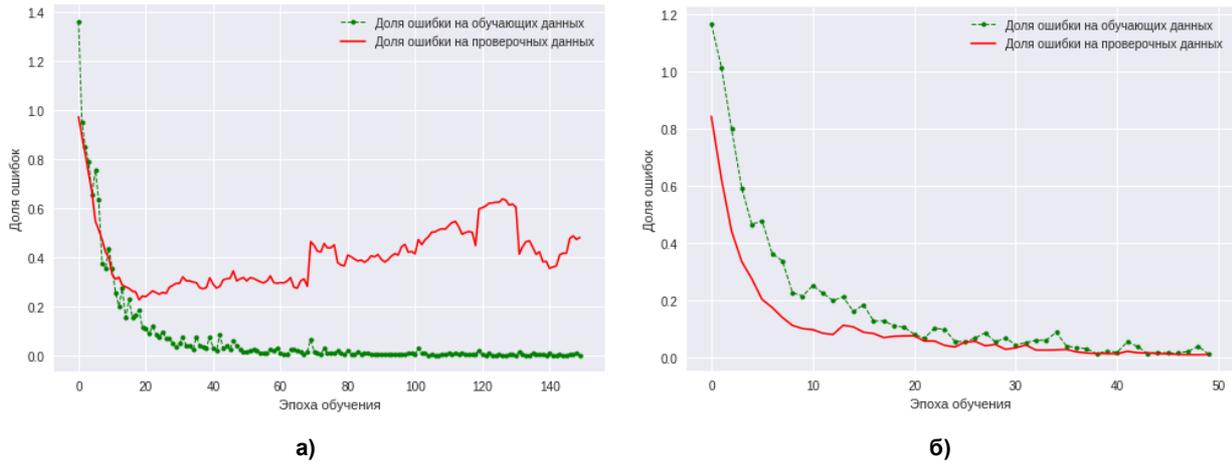


Рис. 4. График оценки ошибки сети на обучающих и проверочных данных по прохождению эпох обучения: а – при 150 эпохах; б – при 50 эпохах

3. Оценка качества работы сети

Оценка качества работы сети проводилась методом кросс-валидации по k -блокам. Имеющийся набор данных случайным образом подразделялся на 20-блоков мини-данных (рис. 5). В качестве обучающей выборки применялись 19 из них, а 1-блок мини-данных – в качестве проверочных. Данное разбиение блоков позволило проводить обучение сети и оценку ошибки сети на этих данных.



Рис. 5. Структурная схема кросс-валидации по k -блокам [20]

Процедура повторялась 20 раз, в результате чего, получено 20 моделей с их оценками качества работы сети ($L_1 \dots L_{20}$). Затем вычислялась средняя ошибка работы модели на основе разных независимых блоков:

$$L_{\text{mean}} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} L_i .$$

Метод кросс-валидации по k -блокам позволил нам выполнить тонкие настройки модели, т. е. находить оптимальные значения гиперпараметров, которые дали удовлетворительную обобщающую способность. После того как определены удовлетворительные значения гиперпараметров, повторно произведен процесс обучения модели на полном обучающем наборе. В результате получена окончательная оценка качества модели на базе независимого тестового набора.

С учетом того, что k -блочная кросс-валидация – это метод генерирования повторных образцов без возврата (непересекающихся образцов), преимущество этого подхода заключается в том,

Информатика и вычислительная техника

что каждая точка образца является частью обучающего и проверочного наборов данных ровно один раз, что в итоге позволяет получить более низкодисперсную оценку качества модели [20].

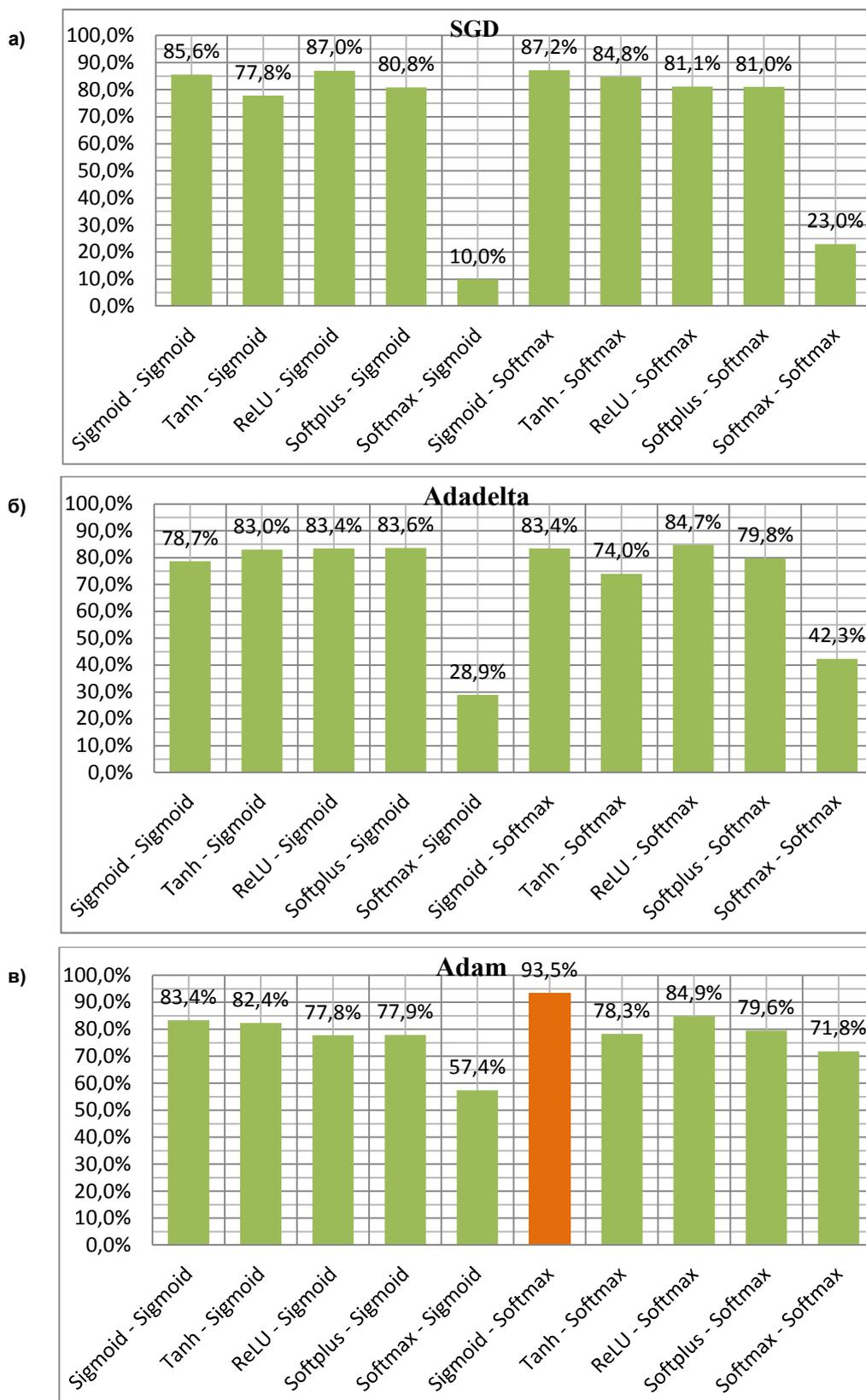


Рис. 6. Точность работы сети при различных комбинациях активационных функций (скрытого и выходного слоя) с оптимизаторами: а – SGD; б – Adadelta; в – Adam

В результате проведения серии экспериментов с различными комбинациями активационных функций и оптимизаторами был получен ряд результатов (рис. 6), по которым можно сделать вывод о целесообразности применения комбинации активационных функций скрытого и выходного слоев «Sigmoid-SoftMax» с оптимизатором «Adam». При такой комбинации достигнута высокая точность работы сети (93,5 %) для обрабатываемых данных.

Заключение

Необходимо отметить, следующее:

- в разработке полученной модели прогнозирования применялись важные и обобщающие факторы, влияющие на возникновение всех видов прихватов, что позволяет прогнозировать все виды прихватов колонн бурильных труб;
- применяемый способ преобразования элементов входных данных позволяет адаптироваться полученной модели НС к новым выборкам, в том числе от скважин различных месторождений;
- экспериментальным способом обоснована архитектура сети и выявлены наилучшие гиперпараметры, а также комбинация активационных функций, которые позволили получить оптимальную модель для решения данной задачи;
- полученная модель может применяться в процессе проектирования и бурения скважины, что позволит минимизировать риски возникновения непредвиденных аварий (прихватов);
- разработанная модель позволяет прогнозировать возникновение и определять тип прихвата на экспериментальных данных с точностью прогнозирования 93 %.

Литература

1. Самотой, А.К. Предупреждение и ликвидация прихватов труб при бурении скважин: учеб. пособие / А.К. Самотой. – М.: Недра, 1979. – 182 с.
2. Самотой, А.К. Анализ априорных данных о факторах, действующих при прихвате колонны труб / А.К. Самотой, О.В. Воротнюк // Борьба с осложнениями при бурении скважин: тр. ВНИИБТ. – 1973. – Вып. 7. – С. 28–37.
3. Аветисов, А.Г. Прогнозирование, предупреждение и ликвидация прихватов с использованием статистических методов / А.Г. Аветисов, М.М. Ахмадуллин, А.К. Самотой // Тематический научно-технический обзор. – М.: ВНИИОЭНГ, 1977. – С. 75–86.
4. Аветисов, А.Г. Методическое руководство по распознаванию, прогнозированию и предупреждению прихватов колонн труб методом последовательной диагностической процедуры / А.Г. Аветисов, М.М. Ахмадуллин, Н.Н. Кошелев. – Краснодар: ВНИИКРнефть, 1977. – 38 с.
5. Мирзаджанзаде, А.Х. Методическое руководство по применению методов распознавания образов при промывке и креплении скважин / А.Х. Мирзаджанзаде, А.И. Булатов, А.Г. Аветисов. – Краснодар, 1974. – 42 с.
6. Мирзаджанзаде, А.Х. Методические указания по применению статистических методов в бурении нефтяных и газовых скважин / А.Х. Мирзаджанзаде, А.Г. Аветисов, А.И. Булатов. – Краснодар, 1983. – 62 с.
7. Липатов, Е.Ю. Исследование и разработка технологии и технических средств для предупреждения и ликвидации прихвата бурильной колонны (на примере месторождений Среднего Приобья): моногр. / Е.Ю. Липатов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – 128 с.
8. Abu-Abed, F.N. Development of Tools for the Analysis of Pre-Emergency Situations on the Drilling Rig Based on Neural Network Technologies // IIIrd International Innovative Mining Symposium. Environment Saving Mining Technologies. – 2018. – 41, 01025. – 8 p. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101025
9. Абу-Абед, Ф.Н. Надежность объектов нефтегазодобывающей промышленности / Ф.Н. Абу-Абед // Газовая промышленность. – 2015. – № S720 (720). – С. 107–111.
10. Абу-Абед, Ф.Н. Автоматизированная система обнаружения предаварийных ситуаций на объектах нефтегазодобывающей промышленности / Ф.Н. Абу-Абед // Каротажник. – 2015. – № 5 (251). – С. 48–61.
11. Абу-Абед, Ф.Н. Снижение риска при строительстве газовых скважин на базе нейросетевой модели / Ф.Н. Абу-Абед // Газовая промышленность. – 2014. – № S712 (712). – С. 100–102.
12. Абу-Абед, Ф.Н. Обнаружение предаварийных ситуаций в процессе промышленного бурения нефтяных скважин: дис. ... канд. техн. наук / Ф.Н. Абу-Абед. – Тверь, 2011. – 206 с.

13. Абу-Абед, Ф.Н. Применение средств моделирования нейросетей для анализа предаварийных ситуаций на буровых / Ф.Н. Абу-Абед, Р.В. Допира // Программные продукты и системы. – 2010. – № 3. – С. 136–139.
14. Абу-Абед, Ф.Н. Разработка средств моделирования нейросетей / Ф.Н. Абу-Абед // Вестник Тверского государственного технического университета. – 2005. – № 7. – С. 125–129.
15. Murillo, A. Pipe sticking prediction and avoidance using adaptive fuzzy logic and neural network modeling / A. Murillo, J. Neuman, R. Samuel // Paper presented at Production and Operations Symposium held in Oklahoma City. – Oklahoma, USA, 2009. – 15 p. SPE 120128. DOI: 10.2118/120128-MS
16. Morteza, E.N. Prediction of drilling pipe sticking by active learning method (ALM) / E.N. Morteza, E. Peyman, J. Saeid // Academic Journals. Journal of Petroleum and Gas Engineering. – 2013. – Vol. 4 (7). – P. 173–183. DOI: 10.5897/JPGE2013.0166
17. Шолле, Ф. Глубокое обучение на Python: справ. пособие / Ф. Шолле. – СПб.: Питер, 2018. – 400 с.
18. Gulli, A. Deep Learning with Keras: hand book / A. Gulli, S. Pal. – Birmingham – Mumbai: Packt, 2017. – 310 p.
19. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Издат. дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
20. Рашка, С. Python и машинное обучение: справ. пособие / С. Рашка. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 418 с.
21. Грас, Дж. Наука о данных с нуля: учеб. пособие / Дж. Грас. – СПб.: БХВ-Петербург, 2017. – 336 с.
22. Jojo, M. Learn Keras for Deep Neural Networks: hand book / M. Jojo. – Canada: Apress, 2019. – 192 p.
23. Ketkar, N. Deep Learning with Python: A Hands-on Introduction / N. Ketkar. – India: Apress, 2017. – 162 p. DOI: 10.1007/978-1-4842-2766-4

Кодиров Шахбоз Шарифович, аспирант, младший научный сотрудник кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; asp18kss327@susu.ru.

Шестаков Александр Леонидович, д-р техн. наук, профессор, ректор, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; admin@susu.ac.ru.

Поступила в редакцию 5 мая 2019 г.

MSC 68T99, 86-08, (86A20)

DOI: 10.14529/ctcr190302

DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR PREDICTING DRILL PIPE STICKING

Sh.Sh. Qodirov, asp18kss327@susu.ru,

A.L. Shestakov, admin@susu.ac.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Stuck piping is a common problem with tremendous impact on drilling efficiency and costs in oil industry. Prediction of stuck at the stage of designing and in the process of drilling wells, minimizes the risk of the occurrence of sticking, due to the choice of the optimal method of prevention for specific geological and technical conditions.

The article is devoted to the development of an artificial neural network for prediction of sticking of drill pipe columns. The paper provides a literature review of existing methods of prediction of

sticks. As input data elements are used important and generalizing factors influencing the emergence of all types of sticks, which allows predicting all types of sticks of drill pipe columns. In order to increase the susceptibility of the input data to the neural network, the data elements are transformed and normalized. The type and architecture of the network, as well as its hyperparameters, are chosen by the experimental method. Assessment of the quality of the network is made by the method of k -fold cross-validation. In order to find the optimal combination of activation function with various optimizers, experimental research is carried out with the analysis of their results.

The experiments were implemented in the Python programming language with KERAS, TensorFlow and Matplotlib library packages, as well as in the cloud platform Colaboratory from Google.

A distinctive feature of the proposed method is that the resulting forecasting model can be easily adapted to new data, which often occurs when drilling wells in new fields.

Keywords: drill string stuck, recognition and prediction, neural networks, multilayer perceptron, data normalization, k -fold cross-validation.

References

1. Samotoy A.K. *Preduprezhdenie i likvidatsiya prikhvatov trub pri bureanii skvazhin: uchebnoe posobie* [Prevention and Elimination of Pipe Sticking in Well Drilling: Manual]. Moscow, Nedra Publ., 1979. 182 p.
2. Samotoy A.K., Vorotnyuk O.V. [Analysis of a Priori Data on the Factors Affecting the Sticking of the Pipe Column]. *Bor'ba s oslozheniyami pri bureanii skvazhin: tr. VNIIBT* [Fight Against Complications at Well-Drilling], 1973, iss. 7, pp. 28–37. (in Russ.)
3. Avetisov A.G., Akhmadullin M.M., Samotoy A.K. [Prediction, Prevention and Liquidation of Sticking Pipe Using Statistical Methods]. *Tematicheskiiy nauchno-tehnicheskiiy obzor* [Thematic Scientific and Technical Review]. Moscow, VNIIOJeNG Publ., 1977, pp. 85–86. (in Russ.)
4. Avetisov A.G., Akhmadullin M.M., Koshelev N.N. *Metodicheskoe rukovodstvo po raspoznavaniyu, prognozirovaniyu i preduprezhdeniyu prikhvatov kolonn trub metodom posledovatel'noy diagnosticheskoy protsedury* [Methodological Guidance on the Recognition, Prognosis and Prevention of Drill String Sticks Using a Sequential Diagnostic Procedure]. Krasnodar, VNIKRneft' Publ., 1977. 38 p.
5. Mirzadzhanzade A.H., Bulatov A.I., Avetisov A.G. *Metodicheskoe rukovodstvo po primeneniyu metodov raspoznavaniya obrazov pri promyivke i kreplenii skvazhin* [Methodological Guidance on the Use of Pattern Recognition Techniques in Flushing and Fixing Wells]. Krasnodar, 1974. 42 p.
6. Mirzadzhanzade A.H., Avetisov A.G., Bulatov A.I. *Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu statisticheskikh metodov v bureanii neftyanykh i gazovykh skvazhin* [Methodological Guidelines on the Application of Statistical Methods in Oil and Gas Drilling]. Krasnodar, 1983. 62 p.
7. Lipatov E.Yu. *Issledovanie i razrabotka tekhnologii i tekhnicheskikh sredstv dlya preduprezhdeniya i likvidatsii prikhvata buril'noy kolonny (na primere mestorozhdeniy Srednego Priob'ya): monografiya* [Research and Development of Technology and Technical Means for Prevention and Liquidation of Drill String Sticking (on the Example of Middle Priobye Fields): Monograph]. Tyumen', TyumGNGU Publ., 2015. 128 p.
8. Abu-Abed F.N. Development of Tools for the Analysis of Pre-Emergency Situations on the Drilling Rig Based on Neural Network Technologies. *IIIrd International Innovative Mining Symposium. Environment Saving Mining Technologies*, 2018, 41, 01025. 8 p. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101025
9. Abu-Abed F.N. [Reliability Objects of Oil and Gas Industry]. *Gas Industry*, 2015, no. S720 (720), pp. 107–111. (in Russ.)
10. Abu-Abed F.N. [Automated System for Detection of Pre-Emergency Situations at Oil and Gas Industry Facilities]. *Karotazhnik*, 2015, no. 5 (251), pp. 48–61. (in Russ.)
11. Abu-Abed F.N. [Risk Minimization during Construction of Gas Wells Based on the Neural Network Model]. *Gas Industry*, 2014, no. S712 (712), pp. 100–102. (in Russ.)
12. Abu-Abed F.N. *Obnaruzheniye predavariynykh situatsiy v protsesse promyshlennogo bureniya neftyanykh skvazhin: dis. kand. tekhn. nauk* [Detection of Pre-Emergency Situations in the Process of Industrial Drilling of Oil Wells. Cand. Sci. Diss.]. Tver', 2011. 206 p.
13. Abu-Abed F.N. [Application of Neural Network Modeling Tools for Analysis of Pre-Emergency Situations on Drilling Sites]. *Software Products and Systems*, 2010, no. 3, pp. 136–139. (in Russ.)

14. Abu-Abed F.N. [Development of Neural Network Simulation Tools]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2005, no. 7, pp. 125–129. (in Russ.)
15. Murillo A., Neuman J., Samuel R. Pipe Sticking Prediction and Avoidance Using Adaptive Fuzzy Logic and Neural Network Modeling. *Paper Presented at Production and Operations Symposium held in Oklahoma City*. Oklahoma, USA, 2009. 15 p. SPE 120128. DOI: 10.2118/120128-MS
16. Morteza E.N., Peyman E., Saeid J. Prediction of Drilling Pipe Sticking by Active Learning Method (ALM). *Academic Journals. Journal of Petroleum and Gas Engineering*, 2013, vol. 4 (7), pp. 173–183. DOI: 10.5897/JPGE2013.0166
17. François Chollet. *Deep Learning with Python: Manual*. Manning Publications, 2017. 386 p.
18. Gulli A., Pal S. *Deep Learning with Keras: Hand Book*. Birmingham – Mumbai: Packt, 2017. 310 p.
19. Haykin S. *Neyronnye seti: polnyy kurs* [Neural Networks: A Comprehensive Foundation]. Moscow, Williams Publ., 2006. 1104 p.
20. Raschka S. *Python Machine Learning*. Packt Publishing. Birmingham, 2015. 454 p.
21. Grus J. *Data Science from Scratch: First Principles with Python*. O'Reilly Media, 2015. 330 p.
22. Jojo M. *Learn Keras for Deep Neural Networks: Hand Book*. Canada: Apress, 2019. 192 p.
23. Ketkar N. *Deep Learning with Python: A Hands-on Introduction*. India: Apress, 2017. 162 p. DOI: 10.1007/978-1-4842-2766-4

Received 5 May 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Кодиров, Ш.Ш. Разработка искусственной нейронной сети для прогнозирования прихватов колонн бурильных труб / Ш.Ш. Кодиров, А.Л. Шестаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 20–32. DOI: 10.14529/ctcr190302

FOR CITATION

Qodirov Sh.Sh., Shestakov A.L. Development of Artificial Neural Network for Predicting Drill Pipe Sticking. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 20–32. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190302

USING DELAUNAY TRIANGULATION FOR FINGERPRINT TEMPLATE GENERATION

V.Yu. Gudkov¹, *diana@sonda.ru*,
D.N. Lepikhova², *lepikhova@sonda.ru*,
M.L. Gavrilova³, *marina@cpsc.ucalgary.ca*,
M.L. Zymbler¹, *mzym@susu.ru*

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² Sonda PRO Ltd, Miass, Russian Federation,

³ University of Calgary, Calgary, Canada

Today, fingerprint identification is the most common method of biometric identification. Existing fingerprint identification models have some defects that reduce the speed and quality of identification. So most of the models do not take into account the topological characteristics of images, for example, the classical method of measuring the ridge count value may produce incorrect results in areas of significant curvature of the ridge lines. This paper presents a new mathematical model for fingerprint identification, taking into account their topological characteristics. Identification is performed on the basis of templates. The templates contain a list of minutiae detected on the image and a list of ridge lines. For the ridge lines and minutiae, sets of topological vectors are constructed. The result of building topological vectors does not depend on the location of minutiae and takes into account their possible mutations, which increases the stability of the proposed mathematical model. Additionally, the stability of the model is ensured by combining the base topological vectors constructed for all minutiae and ridge lines into an expanded topological vector. This view allows you to significantly reduce the size of the template and optimize the use of memory. To compare the fingerprints the Delaunay triangulation is used based on the list of constructed topological vectors. 112 possible classes for topological vectors are defined. This approach allows you to increase the speed of identification up to 10 times while maintaining its accuracy. The proposed classification is resistant to rotation and displacement of images.

Keywords: fingerprint template, Delaunay triangulation, minutiae, topology vector model.

Introduction

Fingerprint images (FI) themselves are not used to identify fingerprints, but templates created on the basis of them using mathematical functions. The bases for the formation of the pattern are minutiae in the form of points of the beginning and ending, merging and bifurcation of the ridge lines [1–3]. They can be detected on the grayscale image, although in the process of creating a pattern, they are more often detected along the skeleton of the ridge lines [4–7] (Fig. 1).

For the reliability of the mathematical model of FI, it must contain the necessary and sufficient number of features [5]. Minutiae, ridge count between them, and also ridge lines in some cases are considered the main informative features [5, 6]. However, most of the models used to prove the uniqueness of the biometric pattern and identification do not contain this in majority [5, 8].

Existing models are focused on improving the accuracy and speed of identification; however, due to the fact that they do not contain sufficiently complete topological information about the image, they all have some drawbacks [9, 10]. For example, the classic method of measuring ridge counting along a straight line can lead to errors in the region of deltas, loops and whorls due to the large

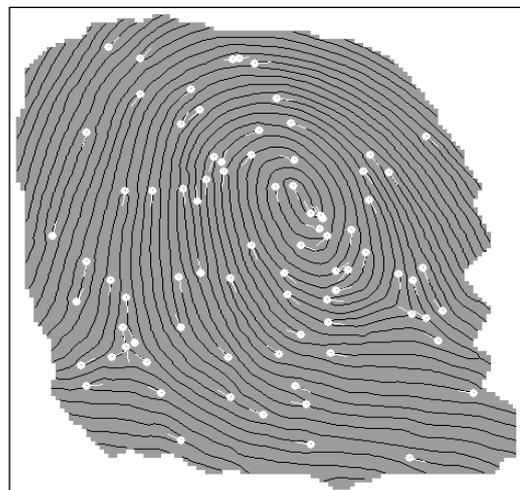


Fig. 1. Skeleton and minutiae

curvature of the lines in these sections [5]. Thus, the task of forming a FI template, taking into account the topological characteristics of the imprint, remains relevant. The article proposes a new model of representation of the FI pattern, using topological vectors of the ridge lines and calculations based on Delaunay triangulation.

The paper is organized as follows. In the introduction, the basic concepts of the subject area are given, relevance is determined, goals and objectives of the research are set. Section 1 provides an overview of the existing research papers. Section 2 describes the proposed methodology. In the conclusion the results are summarized, the directions of further research are determined.

1. Preliminaries

Delaunay triangulation and Voronoi diagrams are widely used in various fields of science, including the field of biometric identification. Compared to earlier work on the use of computational geometry to improve the results of recognition of biometric information [1, 2], the number of attempts to use the topological and geometric characteristics in the identification process has increased significantly [11].

There have been works on the use of Voronoi diagrams for recognition in biometric systems and the implementation of different approaches to comparing FI [2, 10, 12]. Matching fingerprints based on minutiae is used most often. To do this, a set of minutiae is extracted from the fingerprint image and saved as a set of points on the plane [2, 3, 11]. During correlation matching, the images are directly superimposed on each other, aligned and scaled. For each variant of mutual alignment, the correlation value is calculated [13]. Other methods for matching FI (according to the characteristics of ridge lines based on maps and dictionaries of ridge lines and their geometry [14, 15]) are used much less frequently due to the high complexity of implementation [3]. There have been attempts to apply Voronoi diagrams for other areas of biometrics. For example, to recognize facial features in [12]

Voronoi diagrams can be used to reduce the noise level [14]. The Delaunay triangulation constructed on the basis of a set of minutiae was proposed to be used as a comparative index when comparing fingerprints [1]. To do this, there must be at least one matching pair of triangles for two prints. However, due to the poor quality of images of prints or the low efficiency of algorithms for extracting signs, this condition is not satisfied, and a matching pair is not always detected [16, 17]. This is confirmed by other work, proving that even a small local deformation can lead to significant distortions of the pattern [7].

There were also attempts to use not only two-dimensional (2D) Delaunay triangulation, but also three-dimensional (3D) Delaunay tetrahedron [18]. However these structures are more sensitive to the missing and spurious minutiae, and have a negative impact on the effectiveness of the identification.

It is also possible to use triangulation in hierarchical mode and in combination with other approaches to describing minutiae, for example, in conjunction with constructing a local neighborhood for each minutia by the MCC method [19] or computing of common barycenter for all triangles [20].

The research presented in this paper takes advantage of additional information, which is ignored by fingerprint matching algorithms. It is based on ridge line representation as a clever utilization of Delaunay triangulation [21] and topological vectors [22], which results in increased speed and high recognition capability of the system. The method was fully integrated in a commercial software system [22].

2. Proposed Methodology

The representation of a pattern as a set of FI features may vary in implementations of different developers. In some templates, there is a limit on the number of stored minutiae [5]. Some features of templates are irrelevant, but it is possible to indicate their common property: the templates have features, being some metrics for minutiae points. These metrics are ridge counts between minutiae and topological vector for minutiae [5, 22].

In this paper, an image template is constructed in the form of

$$\Gamma: F_0^{(m)} \rightarrow \{L_m, L_l, L_a\}, \quad (1)$$

where $F_0^{(m)} = |f_0^{(m)}(x, y)|$ – image skeleton (Fig. 1); L_m – minutiae list; L_l – list of topological vectors for lines; L_a – list of accelerator vectors for lines. Let's introduce some definitions.

Definition 1. The skeleton of FI is a graph $\langle u, v \rangle$ with nodes u and v . The nodes u and v are lo-

cated near the geometric center of the line. For each node $p_1 \in \langle u, v \rangle$ there are two nodes p_2 and p_3 that are not adjacent to each other.

Definition 2. The skeleton node p_1 , for which there is only one adjacent node p_2 , is called the ending.

Definition 3. If for a skeleton node p_1 there are three adjacent nodes p_2, p_3 and p_4 such that any two nodes from the multitude $\{p_2, p_3, p_4\}$ are pairwise non-adjacent, then the node p_1 is called bifurcation.

Minutiae as the nodes of the skeleton represent the nodes of the graph, and based on which the topological characteristics of the FI are determined and a list of accelerator vectors is compiled. All these vectors do not characterize a separate minutia, but the general properties of the ridge lines. Although the L_l and L_a lists store different characteristics of the FI, in general they are very similar, since they are descriptions of all lines of the pattern. This property allows you to keep the small size of templates for quick matching.

2.1. Minutiae List

The list of minutiae for the subsequent recognition and matching of fingerprints is formed as follows. Let M_i be the minutia with number i . Then the list of all FI minutiae can be written as

$$L_m = \{M_i = \{(x_i, y_i), \alpha_i, t_i, v_i, \theta_i, p_i, h_i\} | i \in 1..n_1\}, \quad (2)$$

where $(x_i, y_i), \alpha_i, t_i, v_i, \theta_i, p_i, h_i$ – coordinates, direction and type of minutiae, as well as value and direction of curvature, probability and density of lines about minutiae; $|L_m| = n_1$ – cardinal number. For reliability of identification, only minutiae from informative areas are taken into account for the template. On Fig. 1 the informative area is highlighted in gray, the skeleton of the image is shown in black.

Coordinates (x_i, y_i) of minutiae M_i are determined by the location of minutia [5, 6]. Direction α_i as an angle is determined based on a simple chain of skeleton vertices for the ending and three simple chains for bifurcation [6]. Type $t_i \in \{0; 1\}$ where 0 is bifurcation and 1 is the ending, is determined by the vertex valence of the graph representing the image skeleton [22]. Coordinates θ_i , direction α_i and type t_i are the basic parameters M_i [23].

The value v_i and the direction of curvature θ_i of the ridge lines are determined within a certain neighborhood of minutia M_i [4-6]. The probability p_i is equal to the ratio of the average value of the image quality rating in the neighborhood ε to the best quality rating in the informative area of FI [23]. The density of the lines h_i is calculated as the average number of lines located in the neighborhood of ε that the perpendicular crosses to the ridge lines [5, 22]. Typically, a neighborhood ε corresponds to 3–5 periods of lines.

2.2. Topological Vectors List

Consider the procedure for building a list of topological vectors for the ridge lines. The list of topological vectors for the lines L_l is constructed on

the basis of the list of the minutiae L_m , the $F_0^{(m)}$ matrix representing the FI skeleton, and other auxiliary matrices that store information about other signs of the FI. Matrices are combined into a pyramid, shown in Fig. 2, and represent the information levels, distributed according to their hierarchical structure [4, 5].

The list of topological vectors for the ridge lines of FI is formed from all the skeleton nodes excluding the minutiae and is written as

$$L_l = \{V_i = \{(e_j, n_j, l_j)\} | i \in 1..n_2, j \in 1..m_l\}, \quad (3)$$

where V_i – topological vector for skeleton nodes cluster; $|L_l| = n_2$ – cardinal number and $n_2 > n_1$; i – index of topological vector; j – number of link

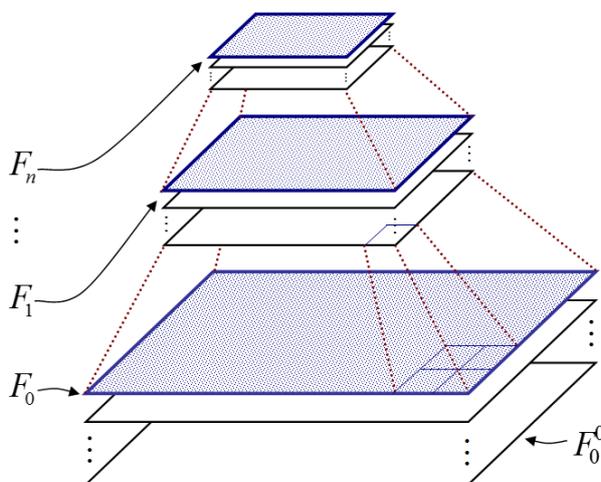


Fig. 2. Layers of the pyramid in the form of a hierarchical structure

in topological vector; e_j – event, and l_j – length of link, formed with minutiae with number n_j ; m_i – quantity of links in the intersection with central line, equal to

$$m_i = 4m + 2. \tag{4}$$

All lists of FI characteristics are based on a similar principle. In the informative area of FI, ridge lines are highlighted and a skeleton is formed. On the skeleton, two types of minutiae are detected: the bifurcations and the endings (Fig. 1) so that the direction of each minutia indicates the area where the number of lines increases [9]. The direction vector of the minutia is parallel to the tangent to the ridge line in some neighborhood of the minutia M_i . Each minutia is characterized not only by the number, coordinates and direction, but also by the type, value, direction and density (2) of lines in the neighborhood and other parameters.

Then, for each minutia, perpendiculars to the direction vector to adjacent lines are constructed and points of projections are fixed. In Fig. 3 perpendiculars are shown by a dotted line, and projections are shown with a filled circle.

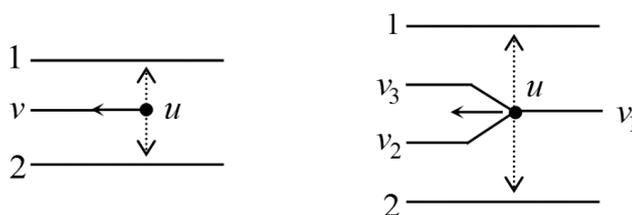


Fig. 3. Projections for ending and bifurcation

The skeleton node p_i is selected (but not the minutia), and the section through this node is constructed to the right and left to a depth of m lines perpendicular to the tangents to the intersected lines. The obtained points of intersection are called “links” and are numbered, for example, in a spiral, starting from the point p_i , in the clockwise direction [22]. The depth of the intersection m can vary from one to eight lines and is the same on the left and on the right. One line forms two links in the intersection. The total number of links is calculated by the formula (4)

The topological vector is formed on the basis of the constructed intersection. For this purpose, all the links, starting from the section and before the meeting with another minutia or its projection on the link, are consistently viewed along the lines. In this case, the following events may be detected (Fig. 4). They are represented in binary code.

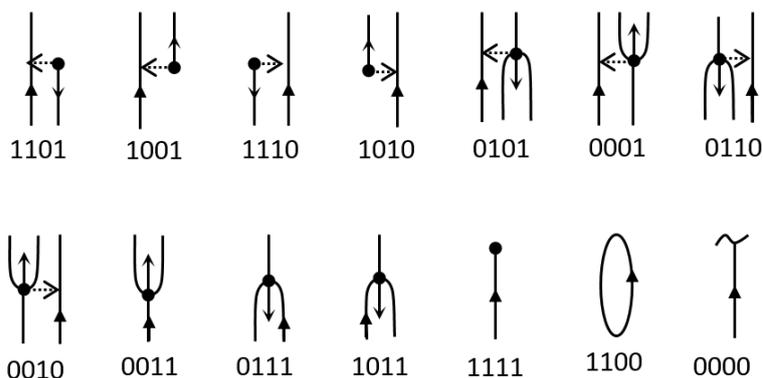


Fig. 4. Events

With the event as a number (there are 14 of them) detected on the link, the number of the minutia that initiates this event is associated. The event is tied to the link number. For events 0000 and 1100, there are no numbers of minutiae, because the line either ends in an uninformative area, or it closes and there is neither a minutia nor a projection on the line. The event and the number of the minutia form an ordered pair (e_j, n_j) which is a topological vector corresponding to the link with number j . Then

the information about the event is supplemented with the value of the link length from the section to the point at which this event is detected.

To construct an extended topological vector, use an ordered triplet (e_j, n_j, l_j) from the event, the number of the minute initiating the event, and the length of the link. The lengths of links, broken on FI edge, are stable in the meaning that they are not shortened in case of fool rolling of the finger.

By the location of the bits in the event, you can determine the type of minutia, its direction and location relative to the course of link. Events allow on-the-fly compare the basic topological vectors and speed up the identification procedure.

Topological vectors are built for all nodes of the skeleton p_i (but not for the minutiae). In this case, the ridge lines of FI are divided into links numbered in a spiral in a clockwise direction. Fig. 5 shows the section for the skeleton node A, which ends with ending 19. The resulting cross-section links are numbered 0–17. The result of constructing a topological vector for node A is shown in Table 1.

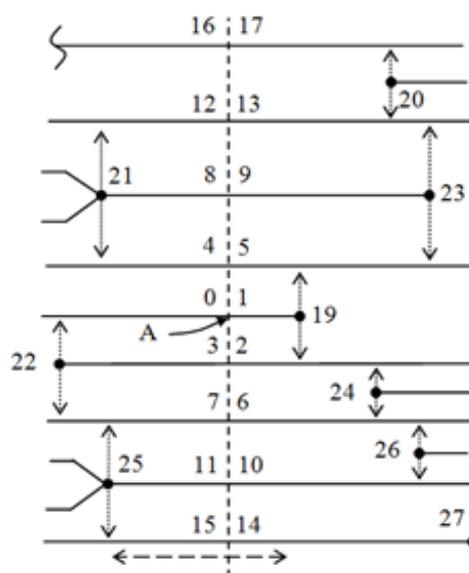


Fig. 5. Section for line with ending

Topological vector for A and B

Table 1

No.	Event	Index	Size
0	1110	22	<i>l</i> 0
1	1111	19	<i>l</i> 1
2	1110	19	<i>l</i> 2
3	1111	22	<i>l</i> 3
4	0001	21	<i>l</i> 4
5	1101	19	<i>l</i> 5
6	1010	24	<i>l</i> 6
7	0010	25	<i>l</i> 7
8	0011	21	<i>l</i> 8
9	1111	23	<i>l</i> 9
10	1010	26	<i>l</i> 10
11	0011	25	<i>l</i> 11
12	0010	21	<i>l</i> 12
13	1010	20	<i>l</i> 13
14	1111	27	<i>l</i> 14
15	0001	25	<i>l</i> 15
16	0000	–	–
17	1001	20	<i>l</i> 17

No.	Event	Index	Size
0	1110	22	<i>l</i> 0
1	1011	19	<i>l</i> 1
2	0111	19	<i>l</i> 2
3	1111	22	<i>l</i> 3
4	0001	21	<i>l</i> 4
5	0101	19	<i>l</i> 5
6	0110	19	<i>l</i> 6
7	0010	25	<i>l</i> 7
8	0011	21	<i>l</i> 8
9	1111	23	<i>l</i> 9
10	1010	26	<i>l</i> 10
11	0011	25	<i>l</i> 11
12	0010	21	<i>l</i> 12
13	1010	20	<i>l</i> 13
14	1111	27	<i>l</i> 14
15	0001	25	<i>l</i> 15
16	0000	–	–
17	1001	20	<i>l</i> 17

In the section for the skeleton node B, which ends with bifurcation 19, and the links are enumerated as 0–17. For node B the topological vector is also presented in table 1. The section is shown by a dotted line. Also Fig. 6 shows the mutation [22] of the ending 19 to bifurcation 19. One of the variants of the occurrence of such a mutation is the noise of the image of the print. Essentially, the nodes A and B are the same.

The choice of the point from which the numbering of links in the section begins for the nodes A and B (the link with the number 0) does not play a special role, since the cases of mirroring of the numbering are easily recognized and taken into account directly by identification. Matching of the constructed sections is performed by analogy with the game “Puzzle” by connecting the corresponding connectors. For a section with depth $m = 4$, $m_l = 18$ links are formed according to formula (4).

The number of topological vectors for FI can be estimated. On Fig. 5, the two-forked dotted arrow indicates the zone between the minutiae 19 and 25, within which the displacement of point A along the line of the skeleton does not affect the synthesized vector. The similar zone between the minutiae 19 and 20 for point B is shown in Fig. 6. If the basic topological vectors coincide, then they are combined into one, in which the minimum bond length is maximum. So, the total number of topological vectors decreases tenfold from $n_2 < 1000$ to $n_1 < 1000$ according to (3). Deformation of the image does not significantly affect the basic vector [22].

The proposed methodology has series of advantages. Firstly, at the events calculation the projection of minutiae is used, that result in prevention of the information loss. Secondly, the links enumerating is turning along the gyrate without links omission. Thirdly, at integration it is possible to choose topological vector with maximum value of minimal length of link [22]. This raises stability and comprehension of the mathematical model.

2.3. Delaunay triangulation

After forming the list of topological vectors for their matching, it is possible to construct the Delaunay triangulation, which is built on the basis of the minutiae list L_m by the formula (2). For the skeleton node A (see Fig. 5), one of the constructed triangles is shown in Fig. 7. The vertices of this triangle are minutia $\{U_i | U_i \in L_m, i \in \{1..3\}\}$ and $\{U_i\} = \{M_j | M_j \in L_m, j \in \{22, 21, 19\}\}$ respectively. By definition,

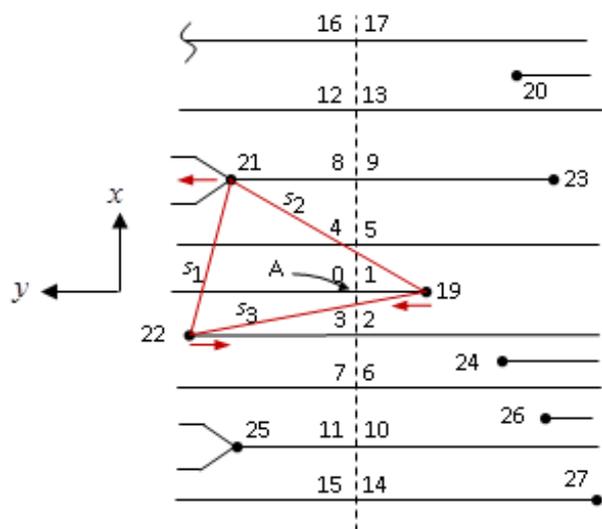


Fig. 7. Delaunay triangulation for node A

The following states are possible: 110, 011, 101, 100, 010, 001 and 000, with the latter corresponding to an equilateral triangle.

Based on the events in the topological vector constructed for node A, it can be seen that the direction of the minutia 22 is opposite to the direction of communication. Therefore, the value of the bit is $\gamma_4 = 1$. Going around the vertices of the triangle clockwise, we get $\gamma_5 = 0$ (the direction of the minutia coincides with the direction of the connection) and $\gamma_6 = 1$. For a random distribution of minutiae, eight states are possible for the values of $\gamma_4, \gamma_5, \gamma_6$.

Node A is on the line starting from minutia 19. If the direction of the node coincides with the direction of the axis of ordinates for the topological vector, then bit $\gamma_7 = 1$, otherwise $\gamma_7 = 0$.

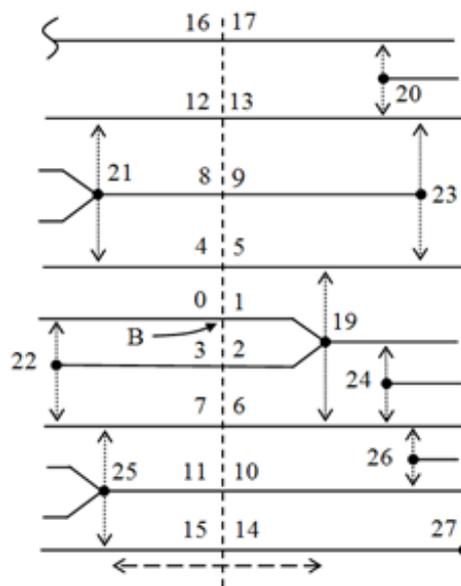


Fig. 6. Section for line with bifurcation

the circle described around any triangle from the constructed triangulation does not contain other points from L_m .

To select an initial point for triangulation, let node A be inside the circle described around the marked triangle. Then the topological vector for the node A section divides the FI into two areas. The ordinate axis will be directed to the area with a large number of vertices of the marked triangle, the abscissa axis coincides with the section. Then the starting point of the triangulation U_s has a positive ordinate and the minimum abscissa value. In Fig. 7 minutia number 22 corresponds to the starting point of U_s .

Starting with U_s , go round all the vortexes of the triangle clockwise, comparing the lengths of its sides $s_2 > s_3, s_3 > s_1$, and form three bits $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$, where $\gamma \in \{0; 1\}$ that define the comparison results.

Calculated bits $C = \{\gamma_k | k \in 1..7\}$ assume 112 possible states ($7 \times 8 \times 8$). These bits are not correlating. There density of distribution is inhomogeneous. The formed 112 descriptors allow for the preliminary classification of topological vectors and sets of minutiae. This classification is resistant to rotations and displacements of images. For the cardinal number of vectors n_2 (3), the list of accelerator vectors can be written as

$$L_a = \{C_i = \{\gamma_k | k \in 1..7\} | i \in 1..n_2\}. \quad (5)$$

Conclusion

The paper presents a mathematical model for the FI identification using topological vectors for the ridge lines. The constructed topological vectors are combined into a connected graph with a high level of redundancy. This allows to link subgraphs of different informative areas of fingerprints. The list of topological vectors for the ridge lines L_l according (3) can be represented in a short version (without lengths of links). Possible mutations of the minutiae do not violate the numbering of links and the order of consideration of the minutiae (table 1). The base topological vectors can be combined into one extended topological vector with maximum length of the minimum link. This increases the stability of the proposed model.

Delaunay triangulation ensuring the reliability of the proposed model and increase the identification rate about ten times. For testing, we used fingerprints obtained from an optical sensor from FVC2000 DB3, FVC2002 DB1, FVC2004 DB1, FVC2006 DB2.

The main characteristics of FI are presented in the form of lists complement each other. The list of topological vectors can be stored in shorted form (without the link lengths). This allows to optimize the amount of memory and reduce the size of the template.

References

1. Bebis G., Deaconu T., Georgiopoulos M. Fingerprint Identification Using Delaunay Triangulation. *Proc. 1999 International Conference on Information Intelligence and Systems (ICIIS99)*. Washington, DC, 1999, pp. 452–459. DOI: 10.1109/iciis.1999.810315
2. Jain A.K., Hong L., Bolle R. On-line Fingerprint Verification. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, vol. 19, no 4, pp. 302–313. DOI: 10.1109/34.587996
3. Jiang X., Yau W.-Y. Fingerprint Minutiae Matching Based on the Local and Global Structures. *Proc. 15th Internet Conference Pattern Recognition (ICPR, 2000)*. Barcelona, Spain, 2000, vol. 2, pp. 1042–1045. DOI: 10.1109/ICPR.2000.906252
4. Gonzalez R., Woods R. *Digital Image Processing*, 2006.
5. Maltoni D., Maio D., Jain A.K. *Handbook of Fingerprint Recognition*. New York, Springer-Verlag, 2003. 348 p. DOI: 10.1007/978-1-84882-254-2
6. Местецкий Л.М. Непрерывная морфология бинарных изображений. М: Физматлит, 2009. 288 p. [Mestetskiy L.M. *Nepreryvnaya morfologiya binarnykh izobrazheniy: figury, skelety, tsyrkulyary* [Continuous Morphology of Binary Images: Figures, Skeletons, Circularity]. Moscow, Fizmatlit, 2009. 288 p.]
7. Ali H.M., Corraya S. Line Profile-Based Fingerprint Matching. *Proc. 2016 International Workshop on Computational Intelligence (IWCI)*. Dhaka, Bangladesh, 2016, pp. 115–119. DOI: 10.1109/IWCI.2016.7860350
8. Kamath S.K.M., Rajeev S., Panetta K., Again S.S. Fingerprint Authentication Using Geometric Features. *Proc. 2017 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)*. Waltham, MA US, 2017, pp. 1–7. DOI: 10.1007/s10044-003-0201-2
9. Kovacs-Vajna Zs., Miklos A. Fingerprint Verification System Based on Triangular Matching and Dynamic Time Warping. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, vol. 22, no. 11, pp. 1266–1276. DOI: 10.1109/34.888711
10. Liang X., Asano T., A Linear Time Algorithm for Binary Fingerprint Image Denoising Using Distance Transform. *IEICE TRANSACTIONS ON Information and Systems*, 2006, vol. E89-D, no. 4, pp. 1534–1542. DOI: 10.1093/ietisy/e89-d.4.1534
11. Wayman J., Jain A.K., Maltoni D., Maio D. *Biometric Systems: Technology, Design and Performance Evaluation*. Springer-Verlag, 2006. DOI: 10.1007/b138151

12. Xiao Y., Yan H. Facial Feature Location with Delaunay Triangulation/Voronoi Diagram Calculation. *Proc. Selected Papers from 2001 Pan-Sydney Area Workshop on Visual Information Processing (VIP2001), CRPIT, vol. 11. Feng D.D., Jin J., Eades P. and Yan H., Eds. ACS, 2002, pp. 103–108.*
13. Ratha N.K., Karu K., Chen S., Jain A.K. A Real-Time Matching System for Large Fingerprint Databases. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, vol. 18, no. 8, pp. 799–813. DOI: 10.1109/34.531800
14. Liao C.C., Chiu C.-T. Fingerprint Recognition with Ridge Features and Minutiae on Distortion. *Proc. 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Shanghai, China, 2016, pp. 2109–2113. DOI: 10.1109/ICASSP.2016.7472049
15. Liu E., Cao K. Minutiae Extraction from Level 1 Features of Fingerprint. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2016, vol. 11, no. 9, pp. 1893–1902. DOI: 10.1109/TIFS.2010.2103940
16. Wang H., Gavrilova M., Luo Y., Rokne J. An Efficient Algorithm for Fingerprint Matching: *Proc. International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2006)*, Hong Kong, 2006, pp. 1034–1037. DOI: 10.1109/ICPR.2006.236
17. Wang C., Gavrilova M. Delaunay Triangulation Algorithm for Fingerprint Matching: *Proc. 2006 3rd International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering (ISVD 2006)*, Alberta, Canada, 2006, pp. 208–216. DOI: 10.1109/ISVD.2006.19
18. Macedo M.J., Yang W., Zheng G., Johnstone M.N. A Comparison of 2D and 3D Delaunay Triangulations for Fingerprint Authentication: *Proc. 15th Australian Information Security Management Conference*. Perth, Australia, 2017, pp. 108–115. DOI: 10.4225/75/5a84f3ca95b4b
19. Dremin A., Khachay M., Leshko A. Fingerprint Identification Algorithm Based on Delaunay Triangulation and Cylinder Codes. *Proc. Third International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts (AIST 2014)*, Yekaterinburg, Russia, 2014, pp. 128–139. DOI: 10.1007/978-3-319-12580-0_13
20. Elmouhtadi M., Elfkihi S., Aboutajdine D. Fingerprint Identification Based on Hierarchical Triangulation. *Journal of Information Processing Systems*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 435–447. DOI: 10.3745/JIPS.02.0084
21. Ghaddab M.H., Jouini K., Korbaa O. Fast and Accurate Fingerprint Matching Using Expanded Delaunay Triangulation. *Proc. IEEE/ACS 14th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)*. Hammamet, Tunisia, 2017, pp. 751–758. DOI: 10.1109/AICCSA.2017.33
22. Sparrow M.K. *Vector Based Topological Fingerprint Matching*. Patent 5631971 USA, Int. Cl. G 06 K 9/00. Field Jul. 15, 1994; Date of patent May. 20, 1997; U.S.Cl. 382/125.
23. ISO/IEC Information Technologies. Biometrics. Biometric Data Interchange Formats. Part 2. Finger Minutiae Data, 2011.

Received 20 March 2019

УДК 004.93

DOI: 10.14529/ctcr190303

ПРИМЕНЕНИЕ ТРИАНГУЛЯЦИИ ДЕЛОНЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ШАБЛОНА ДАКТИЛОСКОПИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

В.Ю. Гудков¹, Д.Н. Лепихова², М.Л. Гаврилова³, М.Л. Цымблер¹

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

² ООО «Сонда ПРО», г. Миасс, Россия,

³ Университет Калгари, г. Калгари, Канада

На сегодняшний день идентификация по отпечаткам пальцев – наиболее распространенный метод биометрической идентификации. Существующие модели идентификации отпечатков пальцев имеют ряд недостатков, влияющих на скорость и качество идентификации. Так большинство моделей не учитывают топологические характеристики изображений, в частно-

сти, классический метод измерения гребневого счета может выдавать неправильные значения в областях значительной кривизны гребневых линий. В статье представлена новая математическая модель для идентификации изображений отпечатков пальцев с учетом их топологических характеристик. Идентификация в рамках предложенной модели выполняется на базе шаблонов. Шаблоны содержат список всех контрольных точек, детектированных на изображении либо на его скелете, и список гребневых линий. Для гребневых линий и контрольных точек строятся наборы топологических векторов. Результат построения топологических векторов не зависит от расположения контрольных точек и учитывает их возможные мутации, что увеличивает стабильность предлагаемой математической модели. Дополнительно стабильность модели обеспечивается путем объединения базовых топологических векторов, построенных для всех контрольных точек и гребневых линий, в расширенный топологический вектор. Такое представление позволяет значительно уменьшить размер шаблона и оптимизировать использование памяти. Для сопоставления отпечатков в предлагаемой модели применяется триангуляция Делоне, которая строится на базе списка построенных топологических векторов. С помощью триангуляции определяются 112 возможных классов для топологических векторов. Такой подход позволяет увеличить скорость идентификации до 10 раз при сохранении ее точности. Предложенная классификация на основе триангуляции Делоне устойчива к поворотам и смещению изображений.

Ключевые слова: шаблон отпечатка пальца, триангуляция Делоне, контрольная точка, модель топологических векторов.

Гудков Владимир Юльевич, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; diana@sonda.ru.

Лепихова Дарья Николаевна, инженер-программист, ООО «Сонда ПРО», г. Миасс; lepikhova@sonda.ru.

Гаврилова Марина Львовна, Ph.D., профессор кафедры компьютерных наук, Университет Калгари, г. Калгари, Канада; marina@cpsc.ucalgary.ca.

Цымблер Михаил Леонидович, канд. физ.-мат. наук, доцент, начальник отдела интеллектуального анализа данных и виртуализации Лаборатории суперкомпьютерного моделирования, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; mzym@susu.ru.

Поступила в редакцию 20 марта 2019 г.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Using Delaunay Triangulation for Fingerprint Template Generation / V.Yu. Gudkov, D.N. Lepikhova, M.L. Gavrilova, M.L. Zymbler // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 33–41. DOI: 10.14529/ctcr190303

FOR CITATION

Gudkov V.Yu., Lepikhova D.N., Gavrilova M.L., Zymbler M.L. Using Delaunay Triangulation for Fingerprint Template Generation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 33–41. DOI: 10.14529/ctcr190303

CONTROL OF NONLINEAR DYNAMICS OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

V.L. Kodkin, kodkina2@mail.ru,

A.S. Anikin, anikinas@susu.ru,

A.A. Baldenkov, baloo@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

This article proposes to analyze the processes in the most widely used at present frequency-controlled AC drives, as in automatic control systems with dynamic non-linearities, and structural correction methods, improving their dynamics. For the first time, dynamic formulas of transfer functions of a torque driver in an asynchronous motor with frequency control, taking into account the slip and frequency of the stator voltage, are proposed. Methods for constructing families of frequency characteristics of such electromechanical systems with “frozen” but different values of the frequency of the stator voltage and slip is described. In the Simulink application of the MATLAB software environment, families of frequency characteristics were constructed corresponding to nonlinear transfer functions. The nonlinear transfer functions obtained in this work made it possible to substantiate the structural solutions of linearizing frequency-controlled electric drives and, significantly, increasing their efficiency. Such a solution turned out to be a positive feedback on the current value of the stator current with a dynamic link. This dynamic link ensures the effective action of a positive connection without disturbing the stability of electromechanical systems. The experiments fully confirmed the correctness of the mathematical expressions obtained for nonlinear links of systems and their correction. This paper is an example of how the initial complicated (but more accurate!) Interpretation of nonlinearity allowed us to find a new best solution to the problem of controlling a complex dynamic object.

Keywords: AC drive, mathematical analysis, dynamic nonlinearity, frequency response, dynamic correction, positive feedback.

Introduction

The widespread use of frequency converters for controlling asynchronous motors in recent years has created the impression that there are no problems in the field of automated electric drive (AED). However, attempts to study in depth the dynamic characteristics of such electric drives make it necessary to return to the study of the problems of control of nonlinear systems. Frequency controlled AEDs are a highly non-linear system. The “main” parameter determining the non-linearity of these systems is the variable frequency of the supply voltage. Unlike the stationary non-linearities of the regulatory systems considered in the 80s and 90s of the 20th century, the variable frequency in the AED changes its frequency response.

Variable frequency, strictly speaking, does not allow the use of a mathematical apparatus designed for AC drives, based on vector analysis, since the vector representation of variables over time implies the constancy of the frequency of the supply voltage, or the frequency of rotation of these vectors. However, due to the absence of another, vector methods are used in most research or educational works on AC drives, despite the fact that the authors quite often recognize the illegality of such an approach.

Problem statement

The most effective engineering method for assessing the dynamics of electric drives is the method of frequency analysis. Direct application of this method to asynchronous electric drives is hampered by the presence of significant non-linearities in them. The construction of the frequency characteristics of

such systems involves a number of inevitable assumptions. After considering the different versions of these assumptions, the calculation of the dynamic mechanical characteristic set forth in the Usoltsev's monograph [1] turned out to be the most acceptable. The calculation a repelled by equation 1.36 on p. 23 [1].

It establishes a connection between the current moment (m) and slip (β) at the nominal frequency ω_{1nom} :

$$m = \frac{2M_k}{(1+T_2'p)\left[\frac{S_k}{\beta}(1+T_2'p)\right] + \frac{\beta}{S_k}}, \quad (1)$$

where $T_2' = \frac{L_k}{R_2}$ – the transient time constant of the rotor, $\beta = \frac{\omega_2}{\omega_1}$ – the relative slip, M_k – the critical moment, S_k – the critical slip at the nominal frequency ω_{1nom} .

At the beginning of the working characteristic (for $M \approx 0$, $\beta \geq 0$), the transfer function is simplified and reduces to a dynamic link of the 1st order:

$$m = \frac{2M_k}{(1+T_2'p)\frac{S_k}{\beta}} = \frac{2M_k\beta}{(1+T_2'p)S_k} = \frac{2M_k(\omega_1-\omega)}{(1+T_2'p)S_k\omega_1}.$$

At the same time, the transfer function linking the absolute slip and the torque developed by the motor will look as follows:

$$W_D(p) = \frac{m}{\Delta\omega} = \frac{2M_k}{(1+T_2'p)S_k\omega_1}. \quad (2)$$

However, the results of experiments given in [2–6, 12, 14] showed that it is incorrect to extend this formula to all operating modes.

Solution

Equation (1) allowed us to propose another variant of linearization, in which the initial equation takes the form:

$$m \left[(T_2')^2 p^2 + 2T_2'p + 1 + \left(\frac{\beta}{S_k}\right)^2 \right] = \frac{2M_k}{S_k} \beta (1 + T_2'p). \quad (3)$$

Then, the equation connecting moment (m), relative slip (β) and engine parameters (T_2' – transition time constant; M_k , S_k – critical moment and critical slip, depending on the frequency ω_1) takes the form:

$$m = \frac{2M_k(T_2'p+1)S_k\beta}{(1+T_2'p)^2 S_k^2 + \beta^2}, \quad (4)$$

and the transfer function linking the absolute slip and moment will take the form:

$$W(p) = \frac{2M_k(T_2'p+1)S_k}{\omega_1[(1+T_2'p)^2 S_k^2 + \beta^2]}, \quad (5)$$

where ω_1 – the frequency of the stator voltage.

The block diagram of the drive in the working area will take the form shown in Fig. 1.

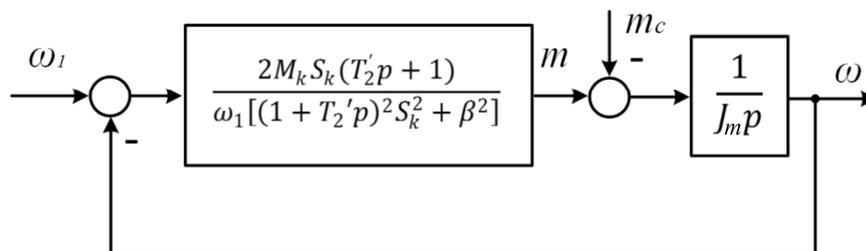


Fig. 1. Structural diagram of an asynchronous motor in the working area

The transfer function of the torque driver changes as the stator voltage and slip frequency varies, i.e. is essentially nonlinear.

It should be noted that at $\beta = 0$, the transfer function, as well as the structural diagram, exactly coincide with the linear transfer function and structural diagram for the asynchronous drive, given in the Usoltsev's monograph [1]. In the proposed non-linear interpretation, the formula and block diagram

explain some of the problems of an asynchronous electric drive. To this end, it is proposed to consider the transfer functions and the corresponding frequency characteristics at “frozen”, but different values of the stator voltage frequency and slip. Moreover, instead of the traditional characteristics of the control object, it will be necessary to consider “families”, grouped by varying stator voltage (its frequency) or slip [7].

Below, the frequency characteristics of an asynchronous electric drive with frequency control based on low-power squirrel cage induction motor are shown in Figs. 2 and 3. They are built in the Simulink application of the MATLAB software [8–11].

Amplitude and phase frequency characteristics of the motor at a stator voltage frequency of 10 Hz and slip corresponding to low ($0.2 M_n$) and nominal loads as shown in Fig. 2. Fig. 3 shows similar characteristics for a stator voltage frequency of 50 Hz.

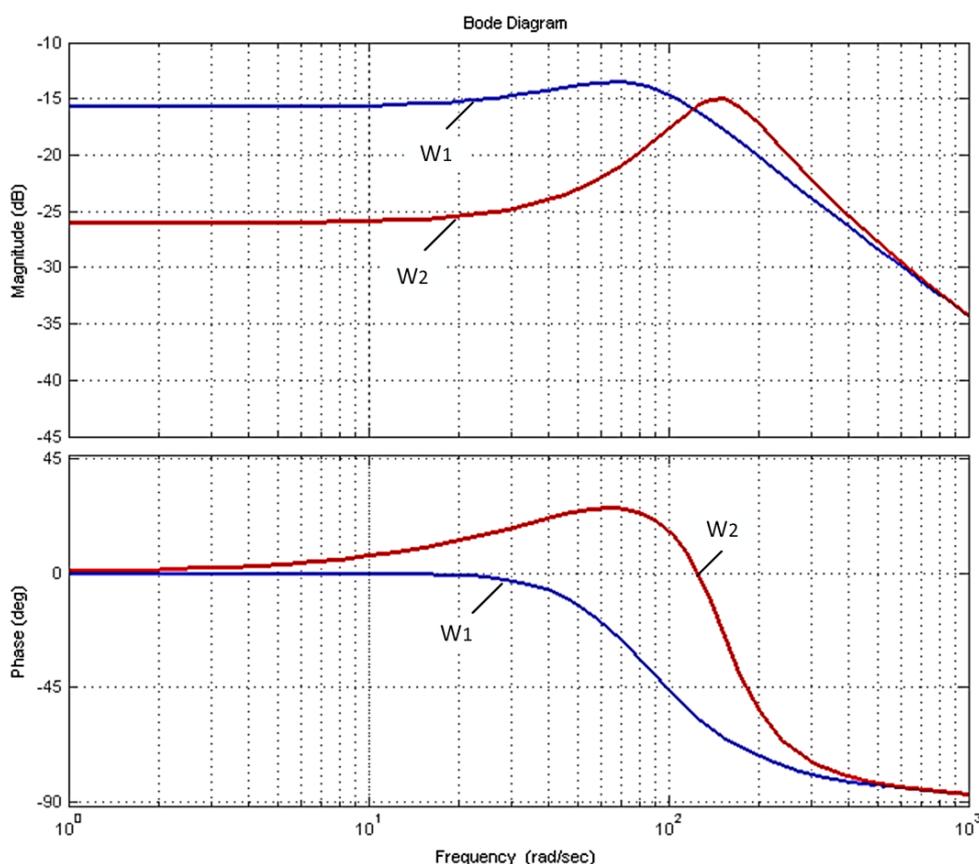


Fig. 2. Frequency responses of an electric motor at a stator voltage frequency of 10 Hz and slip, corresponding to low (W_1) and nominal (W_2) loads

The given frequency responses well explain some problems of AC drive. When operating at low frequencies of the stator voltage, the phase shifts significantly change with changing load (and slip), which leads to instability and inefficient operation at low speeds (Fig. 2). Comparison of frequency responses at frequencies of stator voltage of 10 and 50 Hz shows that in the range from 10 to 100 rad/s the phase shifts of frequency responses have significantly different values – from 25 to -45 electric degree. This means that during acceleration and deceleration, the phase shifts change in such a way that a system with a stability margin at a frequency of 50 Hz can become unstable. The frequency of the stator voltage will be 10 Hz. This may be the reason for the different oscillation of the drive at different frequencies of the stator voltage, which were noted in [7]. Thus, the nonlinearities of the transfer functions of the link of the torque generator (Fig. 1) require linearization to increase the efficiency of the electric drive and the same behavior at different frequencies

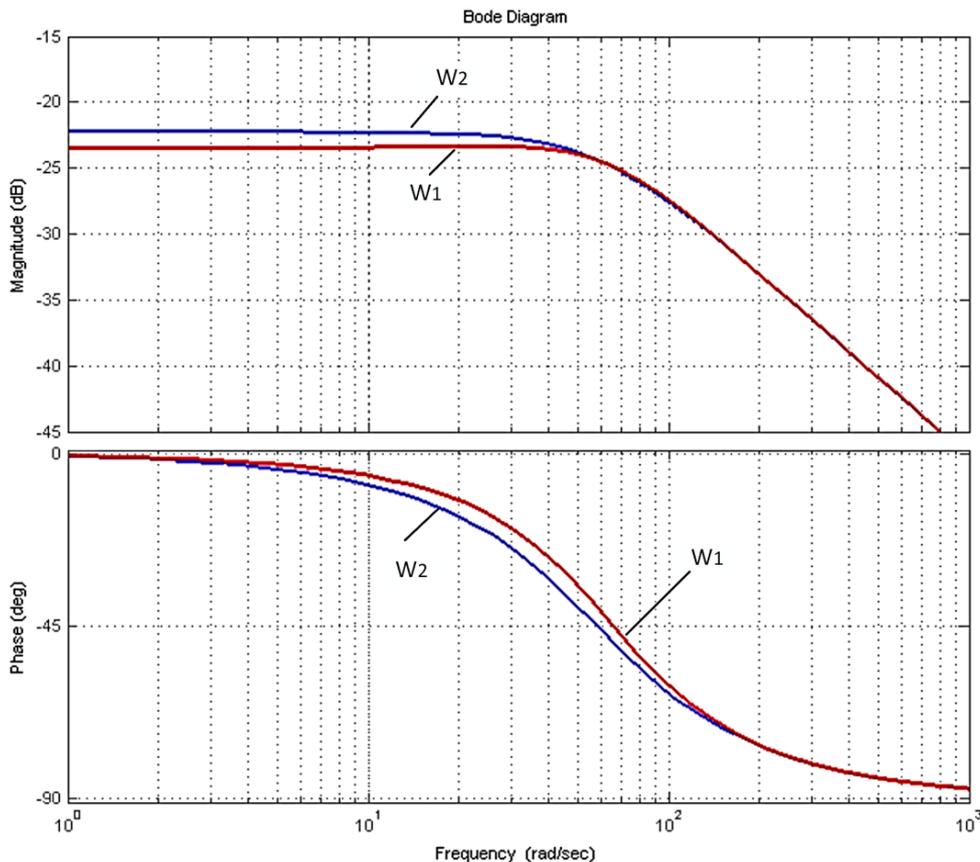


Fig. 3. Frequency responses of an electric motor at a stator voltage frequency of 50 Hz and slip, corresponding to low (W_1) and nominal (W_2) loads

One of the widely used methods of linearization are various types of so-called “Transvector” control. With this control, dynamic links reverse to the dynamic links of the motor are formed in the control device, which are adapted to different modes of operation. Since ideal adaptation is impossible in a real drive, the transfer functions incorporated in the software of frequency converters and real asynchronous motors can vary for a number of reasons: a number of parameters are difficult to measure; the structure of a real electric motor is much more complicated than a model; some parameters may change during operation. Dynamic links are quite complicated, because the equivalent transfer functions of the frequency converter – asynchronous motor can contain resonant links in some modes. These links lead to control failures, to high-frequency harmonics, and to differences in dynamics at different speeds, which were observed during the experiments [1].

Other options for linearizing a torque driver are of interest [7, 14, 15].

Consider the option of applying local feedback on the electromagnetic moment in this structure. The structural diagram is shown in Fig. 4.

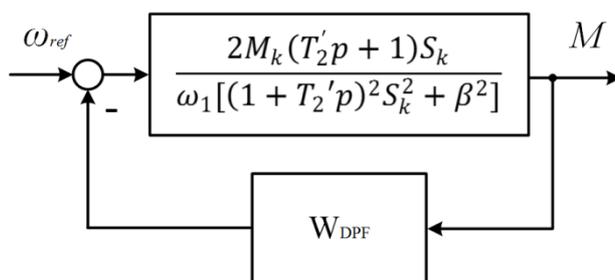


Fig. 4. Block diagram of AED with local feedback on electromagnetic moment

In this case, the transfer function of the torque driver will take the form:

$$W_{\text{eqv}} = \frac{\frac{2M_k(T_2'p+1)S_k}{\omega_1[(1+T_2'p)^2S_k^2+\beta^2]}}{1+\frac{2M_kS_k(T_2'p+1)W_{\text{DPF}}}{\omega_1[(1+T_2'p)^2S_k^2+\beta^2]}} = \frac{2M_kS_k(T_2'p+1)}{\omega_1[(1+T_2'p)^2S_k^2+\beta^2]+2M_kS_k(T_2'p+1)W_{\text{DPF}}}$$

Under the following condition:

$$\omega_1\beta^2 = -2M_kS_k(T_2'p + 1)W_{\text{DPF}},$$

that is, if the corrective element will have the following transfer function:

$$W_{\text{DPF}} = -\frac{\omega_1\beta^2}{2M_kS_k(T_2'p+1)}, \quad (6)$$

then the transfer function of the torque driver takes the form:

$$W_{\text{eqv}} = \frac{2M_kS_k(T_2'p+1)}{\omega_1[(1+T_2'p)^2S_k^2]} = \frac{2M_k}{\omega_1S_k(1+T_2'p)},$$

that is, it becomes a linear link, independent of slip (load), and completely coinciding with the transfer function (2), given in the Usoltsev's monograph [1] for small loads. Pay attention to the formula (8). The dynamic link is a first-order inertia with a coefficient that ultimately depends on the frequency of the stator voltage and on the absolute slip. The sign (-) in front of the formula means that the feedback must be positive. Let's call this connection – dynamic positive feedback (DPF+). It should be noted that the correction of the coefficient of frequency is very easy to implement in frequency converters. Thus, the proposed positive feedback, selected by condition (6), makes it possible to compensate for the external load and the nonlinearity of the asynchronous electric drive, spreading the transfer function of the motor as a 1st order link for any β values. In addition, the block diagram (Fig. 1) and the transfer function of the moment drive link (5) connecting the moment and slip allow us to offer an estimate of the efficiency of the moment drive algorithm: the algorithm that generates the necessary moment with the smallest absolute slip will be more effective [12–15].

Next, we consider the correction of the asynchronous electric drive with the parameters corresponding to the frequencies of the supply voltage (FSV) of 10 and 50 Hz. The initial frequency responses are shown in Fig. 2 and 3. The transfer functions of the initial AED with such parameters and the transfer functions of the corrective links are presented in Table 1. The frequency characteristics of the initial and adjusted AED are shown in Figs. 2, 5 and 6 for the supply voltage frequency of 10 and 50 Hz, respectively.

Table 1

The transfer functions of the torque driver of the initial AED and the corrective element

FSV	*	$W_{\text{AED}}(p)$	W_{PFB}
10 Hz	β_1	$\frac{0,038p + 0,226}{0,0002p^2 + 0,0229p + 1,38}$	$\frac{0,707}{0,0038p + 0,226}$
	β_2	$\frac{0,038p + 0,226}{0,0002p^2 + 0,0229p + 4,52}$	$\frac{3,84}{0,0038p + 0,226}$
50 Hz	β_1	$\frac{0,027p + 1,548}{0,006p^2 + 0,628p + 20,56}$	$\frac{0,141}{0,27p + 1,548}$
	β_2	$\frac{0,027p + 1,548}{0,006p^2 + 0,628p + 21,19}$	$\frac{0,77}{0,27p + 1,548}$

* β_1 – corresponds to slip at low load, β_2 – corresponds to slip at rated load.

As expected, the frequency responses of the AED with the structural correction proposed in the work are close to the frequency responses of the 1st order linear link.

In widely used AEDs, it is very difficult to realize the link by mechanical moment. Given that the moment is equal to $I_1 \cdot \Psi_2$ and in almost all calculations it is assumed that the rotor flux linkage is constant, you can replace the original signal in this local connection with the effective value of the stator current, or its active component, which is calculated in all frequency converters.

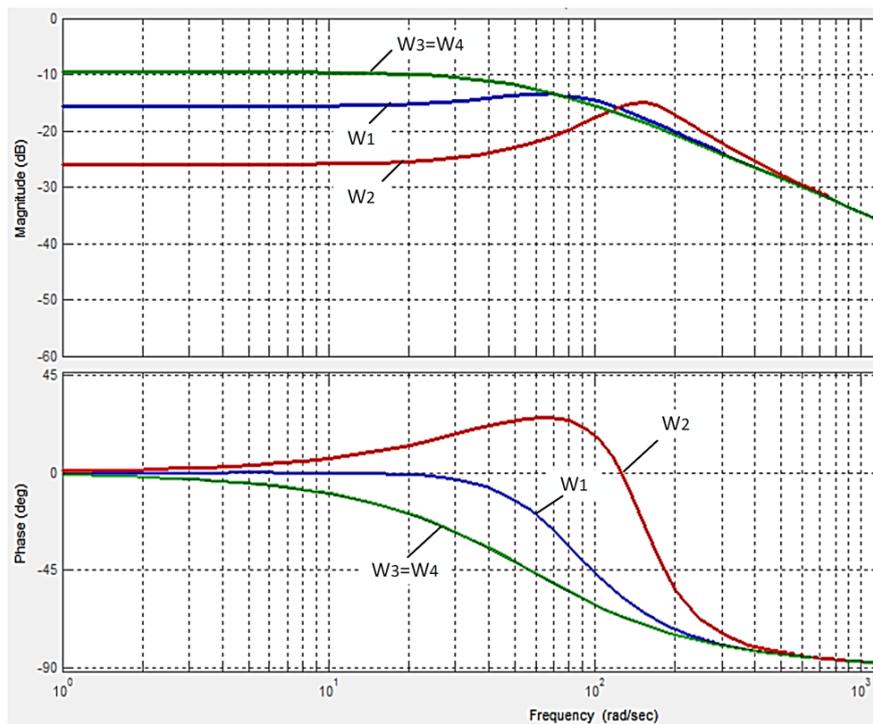


Fig. 5. Frequency responses of the torque driver link: initial (W_1, W_2) and corrected (W_3, W_4) for the supply voltage frequency 10 Hz

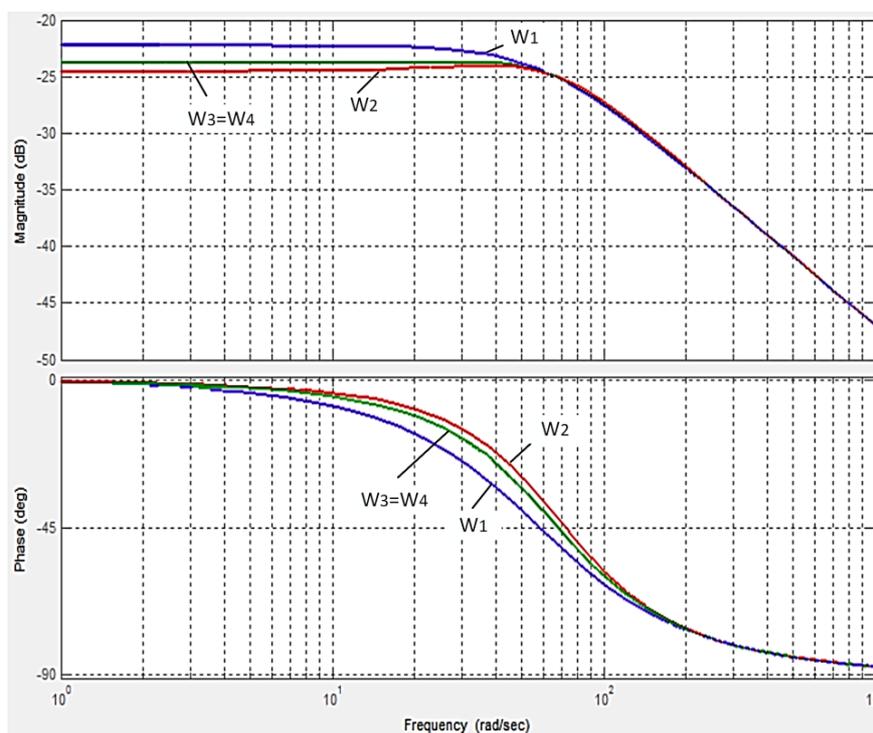


Fig. 6. Frequency responses of the torque driver link: initial (W_1, W_2) and corrected (W_3, W_4) for the supply voltage frequency 50 Hz

For stator current feedback, the linearization condition will vary slightly:

$$\omega_1 \beta^2 = -2M_k S_k (T_2' p + 1) \frac{W_{\text{PFB}}}{\Psi_2}$$

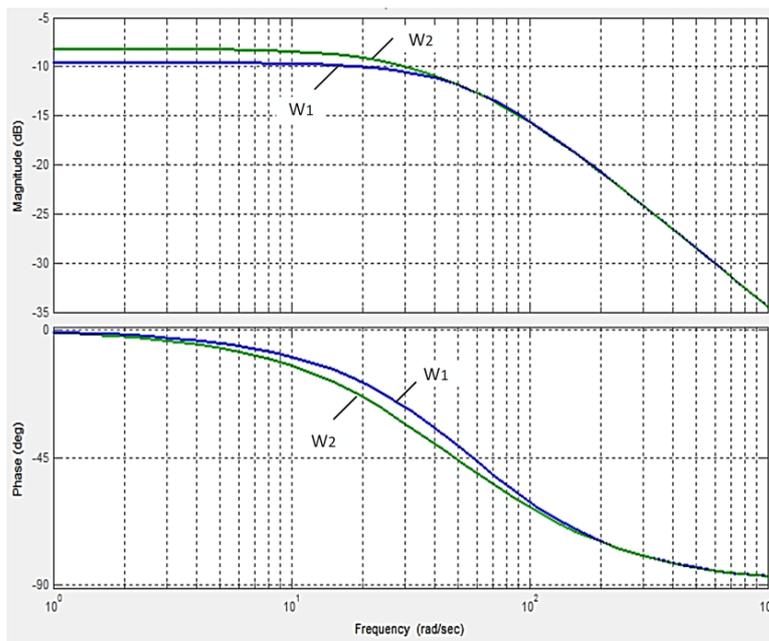
This expression shows that when controlling the flux linkage, the linearization conditions can be refined, thereby ensuring high quality regulation.

On the other hand, it is easy to show that with some inaccuracy in the fulfillment of the linearization condition, i.e.

$$\frac{\beta}{S_k} - \frac{2M_k(T_2 p + 1) \cdot W_1}{\Psi_2} \neq 0 = \Delta.$$

The transfer function and frequency response of the torque driver will differ slightly from the transfer function and frequency response of the first-order linear link.

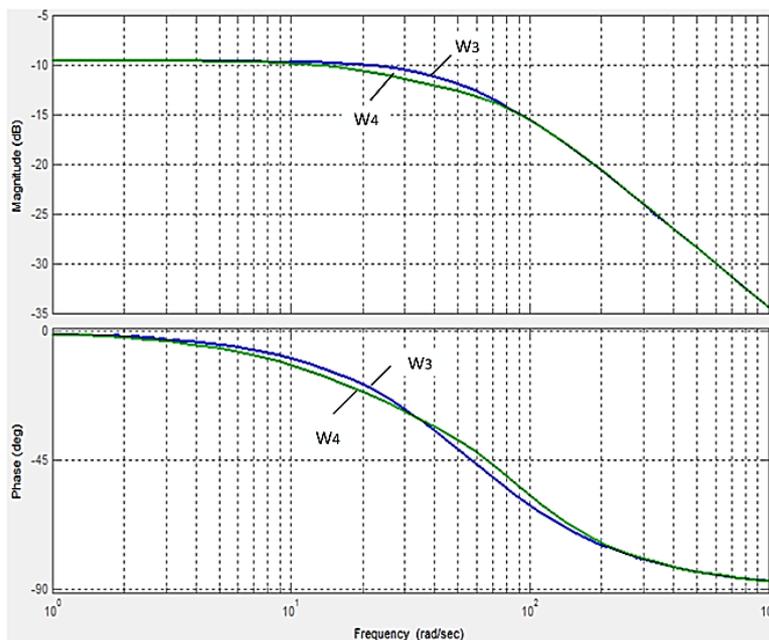
Consider the case of deviation of the parameters of the corrective element by 5% for the frequencies of the supply voltage of 10 and 50 Hz. The frequency characteristics of the link of the torque driver with accurate correction (W_1, W_2) and the deviation of the transmission coefficient of the correction link $\pm 5\%$ (W_3, W_4) are presented in Figs. 7 and 8.



$$W_{\text{PFB } 1} = \frac{3,84}{0,0038p + 0,226}$$

$$W_{\text{PFB } 2} = \frac{4}{0,0038p + 0,226}$$

Fig. 7. Frequency response of the torque driver and transfer functions of the correction link for the stator voltage frequency of 10 Hz, accurate (W_1) and when the transfer ratio of the correction link deviates by 5% (W_2)



$$W_{\text{PFB } 1} = \frac{3,84}{0,0038p + 0,226}$$

$$W_{\text{PFB } 2} = \frac{3,84}{0,0042p + 0,226}$$

Fig. 8. Frequency response of the torque driver and transfer functions of the correction link for the stator voltage frequency of 50 Hz, accurate (W_3) and when the transfer ratio of the correction link deviates by 5% (W_4)

Conclusion

Thus, the proposed method for analyzing processes in an asynchronous drive with frequency control according to changing transfer functions and frequency characteristics (“families” of functions and characteristics with frozen frequency and slip parameters) made it possible to propose an effective correction, in terms of controllability of a nonlinear dynamic structure, allowing increase its effectiveness.

References

1. Usol'tsev A.A. *Chastotnoye upravlenie asinkhronnimi dvigatelyami: uchebnoye posobiye* [Frequency Control of Asynchronous Motors. Study Guide]. St. Petersburg, St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics Publ., 2006. 94p.
2. Lifanov V.A., Levintova S.D. (Eds.) *Issledovaniya avtomatizirovannykh elektroprivodov, elektricheskikh mashin i ventil'nykh preobrazovateley: tematicheskii sbornik nauchnykh trudov* [Research of Automatic Electric Drives, Electrical Machines and Valve Inverter: Thematic Digest of Scientific Works]. Chelyabinsk, ChPI Publ., 1990. 160 p.
3. Figaro B.I., Pavlyachik L.B. *Reguliruyemyye elektroprivody peremennogo toka* [Regulating Electrical Drives of Alternating Current]. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ., 2006. 363 p.
4. Eshchin E.K. *Elektromekhanicheskiye sistemy mnogodvigatel'nykh elektroprivodov. Modelirovaniye i upravleniye* [Electromechanical Systems of Multimotor Drives. Modeling and Controlling]. Kemerovo, State Technical University of Kuzbass, 2003. 247 p.
5. Marc Perron, Hoang Le-Huy. Full Load Range Neural Network Efficiency Optimization of an Induction Motor with Vector Control Using Discontinuous PWM. *IEEE, International Symposium on Industrial Electronics*, 2006, vol. 1. DOI: 10.1109/ISIE.2006.295586
6. Sokolovskiy G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniyem* [Electrical Drives of Alternating Current with Frequency Controlling]. Moscow, ACADEMIA, 2006. 267 p.
7. Kodkin V.L., Anikin A.S., Baldenkov A.A. The Dynamics Identification of Asynchronous Electric Drives via Frequency Response. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 66–73. DOI: 10.11591/ijpeds.v10.i1.pp66-73
8. Hoang Le-Huy. Modeling and Simulation of Electrical Drives Using MATLAB/Simulink and Power System Blockset. *IECON'01, 27-th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2001, vol. 3. DOI: 10.1109/IECON.2001.975530
9. Hoang Le-Huy, Sybille G. MATLAB/Simulink and PSPice as Modelling Tools for Power Systems and Power Electronics. *Power Engineering Society Summer Meeting*, 2000, vol. 2. DOI: 10.1109/PESS.2000.867449
10. Champagne R., Dessaint L.-A., Fortin-Blanchette H. Real-Time Simulation of Electric Drives. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2003, no. 63 (3-5), pp. 173–181. DOI: 10.1016/S0378-4754(03)00065-X
11. Louis-A. Dessaint, Kamal Al-Haddad. Modelling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2003, no. 63 (3-5), pp. 135–143. DOI: 10.1016/S0378-4754(03)00170-8
12. Kodkin V.L., Anikin A.S., Baldenkov A.A. Experimental Research of Asynchronous Electric Drive with Positive Dynamic Feedback on Stator Current. *III International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*, 2017, Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8076179/>
13. Anikin A.C., Kodkin V.L., Baldenkov A.A. [Dynamic Positive Coupling in Asynchronous Electric Drives with Frequency Control]. *Priorities of World Science: Experiment and Scientific Discussion*. Scientific and Publishing Center “Otkrytie”, North Charleston, USA, 2015, pp.119–124. (in Russ.)
14. Kodkin V.L., Shmarin Ya.A., Anikin A.S., Baldenkov A.A., Loginova N.A. [Correction of Dynamic Moment Perturbations in Electric Drives of Alternating Current]. *Science of SUSU*, 2016, pp. 805–814. (in Russ.)
15. Kodkin V.L., Shmarin Ya.A., Anikin A.S., Baldenkov A.A. *Ustroystvo chastotnogo upravleniya asinkhronnym elektroprivodom* [Device of Frequency Control of an Asynchronous Electric Drive]. Patent RF, no. 2599529, 2016.

Received 20 May 2019

**УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКОЙ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ****В.Л. Кодкин, А.С. Аникин, А.А. Балденков***Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Предлагается анализировать процессы в наиболее широко применяемых в настоящее время частотно-регулируемых электроприводах переменного тока, как в системах автоматического регулирования с динамическими нелинейностями, и структурные методы коррекции, совершенствующие их динамику. Впервые предложены динамические формулы передаточных функций формирователя вращающего момента в асинхронном электродвигателе с частотным управлением, учитывающие скольжение и частоту статорного напряжения. Изложены методы построения семейств частотных характеристик таких электромеханических систем при «замороженных», но различных значениях частоты статорного напряжения и скольжения. В приложении Simulink программной среды MATLAB построены семейства частотных характеристик, соответствующие нелинейным передаточным функциям. Полученные в работе нелинейные передаточные функции позволили обосновать структурные решения, линеаризующие частотно-регулируемые электроприводы и существенно повышающие их эффективность. Таким решением оказалась положительная обратная связь по действующему значению тока статора с динамическим звеном. Именно это динамическое звено обеспечивает эффективное действие положительной связи без нарушения устойчивости электромеханических систем. Эксперименты полностью подтвердили правильность полученных математических выражений для нелинейных звеньев систем и их коррекции. Данная работа является примером того, как исходная усложненная (но более точная!) интерпретация нелинейности позволила найти новое лучшее решение задачи управления сложным динамическим объектом.

Ключевые слова: электропривод переменного тока, математический анализ, динамическая нелинейность, частотная характеристика, динамическая коррекция, положительная обратная связь.

Литература

1. Усольцев, А.А. *Частотное управление асинхронными двигателями: учеб. пособие / А.А. Усольцев.* – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
2. *Исследования автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентиляционных преобразователей: темат. сб. науч. тр. / под ред. В.А. Лифанова, С.Д. Левинтова.* – Челябинск: ЧПИ, 1990. – 160 с.
3. Фигаро, Б.И. *Регулируемые электроприводы переменного тока / Б.И. Фигаро, Л.Б. Павлячик.* – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
4. Ещин, Е.К. *Электромеханические системы многодвигательных электроприводов. Моделирование и управление / Е.К. Ещин.* – Кемерово: Кузбасский гос. техн. ун-т, 2003. – 247 с.
5. Marc Perron; Hoang Le-Huy. *Full Load Range Neural Network Efficiency Optimization of an Induction Motor with Vector Control using Discontinuous PWM / Marc Perron; Hoang Le-Huy // IEEE International Symposium on Industrial Electronics.* – 2006. – Vol. 1. DOI: 10.1109/ISIE.2006.295586
6. Соколовский, Г.Г. *Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г.Г. Соколовский.* – М.: АCADEMIA, 2006. – 267 с.
7. Kodkin, V.L. *The dynamics identification of asynchronous electric drives via frequency response / V.L. Kodkin, A.S. Anikin, AA Baldenkov // International Journal of Power Electronics and Drive Systems.* – 2019. – Vol. 10, no. 1. – P. 66–73. DOI: 10.11591/ijpeds.v10.i1.pp66-73
8. Hoang Le-Huy. *Modeling and simulation of electrical drives using MATLAB/Simulink and Power System Blockset / Hoang Le-Huy // IECON'01, 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.* – 2001. – Vol. 3. DOI: 10.1109/IECON.2001.975530
9. Hoang Le-Huy. *MATLAB/Simulink and PSPice as modelling tools for power systems and power electronics / Hoang Le-Huy, G. Sybille // Power Engineering Society Summer Meeting.* – 2000. – Vol. 2. DOI: 10.1109/PESS.2000.867449

10. Champagne, R. Real-time simulation of electric drives / R. Champagne, L.-A. Dessaint, H. Fortin-Blanchette // *Mathematics and Computers in Simulation*. – 2003. – No. 63 (3-5). – P. 173–181. DOI: 10.1016/S0378-4754(03)00065-X

11. Dessaint, L.-A. Modelling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems / Louis-A. Dessaint, Kamal Al-Haddad // *Mathematics and Computers in Simulation*. – 2003. – No. 63 (3-5). – P. 135–143. DOI: 10.1016/S0378-4754(03)00170-8

12. Kodkin, V.L. Experimental Research of Asynchronous Electric Drive with Positive Dynamic Feedback on Stator Current / V.L. Kodkin, A.S. Anikin, A.A. Baldenkov // *III International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017*. – 2017. – <https://ieeexplore.ieee.org/document/8076179/>

13. Аникин, А.С. Динамическая положительная связь в асинхронных электроприводах с частотным управлением / А.С. Аникин, В.Л. Кодкин, А.А. Балденков // *Приоритеты мировой науки: эксперимент и научная дискуссия: материалы 8-й междунар. науч. конф. Научно-издательский центр «Открытие». North Charleston, SC, USA, 17–18 June 2015*. – С. 119–124.

14. Коррекция динамических моментных возмущений в электроприводах переменного тока / В.Л. Кодкин, Я.А. Шмарин, А.С. Аникин и др. // *Наука ЮУрГУ. Материалы 68-й научной конференции*. – 2016. – С. 805–814.

15. Пат. 2599529 Российская Федерация, МПК H02P03/04. Устройство частотного управления асинхронным электроприводом / В.Л. Кодкин, Я.А. Шмарин, А.С. Аникин, А.А. Балденков. – № 2014151549/07; заявл. 17.11.2015; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 28.

Кодкин Владимир Львович, д-р техн. наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kodkina2@mail.ru.

Аникин Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; anikinas@susu.ru.

Балденков Александр Александрович, аспирант кафедры автоматизированного электропривода, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; baloo@mail.ru.

Поступила в редакцию 20 мая 2019 г.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Kodkin, V.L. Control of Nonlinear Dynamics of Electromechanical Systems / V.L. Kodkin, A.S. Anikin, A.A. Baldenkov // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 42–51. DOI: 10.14529/ctcr190304

FOR CITATION

Kodkin V.L., Anikin A.S., Baldenkov A.A. Control of Nonlinear Dynamics of Electromechanical Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 42–51. DOI: 10.14529/ctcr190304

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ПО ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ РАБОТАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

В.И. Панферов^{1,2}, С.В. Панферов¹, К.С. Халдин³

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

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

³ Target Games, центр разработки компьютерных игр, г. Екатеринбург, Россия

Известно, что динамические свойства промышленных объектов по каналам управления обычно существенно меняются при изменении режима их работы. Поэтому показатели качества регулирования с неизменными настройками автоматических регуляторов тоже изменяются, причем, как правило, ухудшаются в процессе работы агрегатов. В связи с этим возникает задача периодической корректировки параметров настройки регуляторов в контурах работающих систем автоматического регулирования (САР). Указанную задачу можно решить только по фактическим динамическим параметрам эксплуатируемого объекта, поэтому в работе рассматривается задача оценки этих параметров, причем по реальным данным работающей замкнутой системы. При этом используется ступенчатое возмущение либо по заданию, либо со стороны регулирующего органа (по нагрузке), также может быть использована опытная реакция системы на возмущение любого вида по указанным каналам. Объект управления описывается дифференциальным уравнением второго порядка с запаздыванием. Критерий параметрической идентификации квадратичный, либо модульный или минимаксный. Задача идентификации решается с помощью программы, реализующей метод покоординатного спуска, получающиеся при этом задачи одномерной минимизации решаются с помощью подпрограммы, использующей метод золотого сечения. Для численного интегрирования уравнения объекта применяли метод Рунге – Кутты с погрешностью, пропорциональной пятой степени шага по времени. В работе проведена апробация разработанных программ параметрической идентификации по экспериментальным переходным характеристикам САР давления в металлургической печи. Указаны численно-аналитические процедуры настройки регуляторов в САР по найденным параметрам объекта управления.

Ключевые слова: автоматический регулятор, качество регулирования, переходная функция, замкнутая система автоматического регулирования, изменчивость характеристик объекта управления, параметрическая идентификация модели, коррекция настроек регулятора.

Постановка задачи

Из литературных и практических данных хорошо известно, что динамические свойства объектов управления по каналам регулирования обычно существенно изменяются при изменении режима их работы, обусловленного, например, изменением характеристик обрабатываемых материалов, темпа производства и т. п. Так, например, в нагревательных и термических печах коэффициент передачи по каналу «расход топлива – температура в зоне» может изменяться в процессе работы печей в несколько раз [1–4]. Изменчивость динамических параметров объектов приводит к тому, что показатели качества регулирования с неизменными настройками автоматических регуляторов тоже изменяются, причем, как правило, ухудшаются в процессе работы. Попытки выявления и использования причинно-следственных связей для отслеживания значений динамических параметров [4, 5] с целью улучшения показателей качества регулирования в целом не решают проблему из-за существенной нестабильности этих взаимосвязей. В этих условиях целесообразно периодически в процессе работы системы автоматического регулирования (САР) определять динамические характеристики каналов регулирования и периодически оптимизировать параметры настройки регуляторов по найденным оценкам этих характеристик. В данной ра-

боте рассматривается решение этой задачи – задачи оценки параметров объекта управления в замкнутом контуре работающей САР и настройки входящего в ее состав регулятора.

Известны различные способы решения задачи настройки регуляторов в контурах работающей системы. При микропроцессорной реализации САР часто используются так называемые экспертные алгоритмы настройки, основанные на использовании реакции работающей системы на ступенчатое воздействие (переходной функции замкнутой системы) [6–8]. При этом применяется либо возмущение по заданию, либо возмущение со стороны регулирующего органа (по нагрузке – возмущающее воздействие $f(t)$ на рис. 1). Последнее воздействие может быть организовано путем подачи по каналу интерфейсной связи контроллера команды перевода контура регулирования в режим ручного управления с последующим быстрым изменением положения регулирующего органа и немедленным возвратом в автоматический режим.

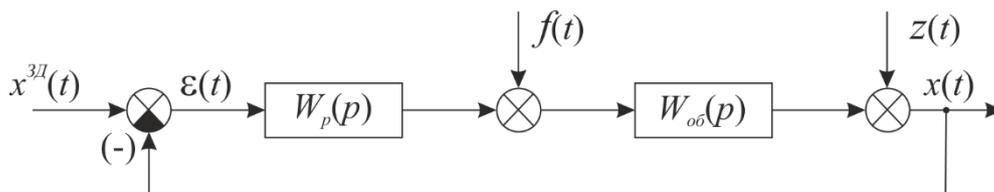


Рис. 1. Структурная схема системы автоматического регулирования

При этом заметим, что указанное на рис. 1 и часто упоминаемое в литературе возмущающее воздействие $z(t)$ – это так называемое возмущение, приведенное к выходу объекта, в части исследования качества регулирования практически ничего не дает, поскольку передаточные функции САР для этого возмущения по любым каналам отличаются от передаточных функций САР для задающего воздействия только знаком «–». Поэтому в данной работе переходные процессы, обусловленные этим возмущением, не исследуются.

Экспертные алгоритмы настройки имеют ряд недостатков, об этом достаточно подробно указано в работах [9, 10]. В качестве альтернативы предлагается формализованная процедура настройки, основанная на частотном подходе [11–13]. Здесь в замкнутом контуре регулирования возбуждаются автоколебания, амплитуда и частота которых оцениваются алгоритмом автонастройки, а затем используются для настройки регулятора данного контура. Однако частотные методы разработаны в период, когда не существовало возможности прямого решения проблемы оптимизации настройки с помощью компьютерной математической модели САР и численных методов нелинейного программирования. Кроме того, частотная методика является графоаналитической, в ней используется ряд допущений и, как правило, велика трудоемкость применяемых процедур. К тому же точность настройки контуров регулирования такими методами уже нельзя признать удовлетворительной. В настоящее время предпочтительнее использовать формальные компьютерные алгоритмы параметрической настройки, разработанные на основе достаточно точных математических моделей САР и численных методов оптимизации [14]. Вопросы достижения требуемой точности настройки и уменьшения объема необходимых графических построений и сопутствующих им «ручных» вычислений при этом автоматически снимаются.

Решение задачи параметрической идентификации

Расчет параметров настройки регулятора должен начинаться с определения динамических характеристик объекта управления, поэтому в любом случае сначала рассматривается эта задача. Причем особенность этой задачи в данном случае заключается в том, что динамические свойства объекта управления необходимо определить по тому, как изменяется выходная величина САР при отработке внесенного возмущения либо по заданию, либо по нагрузке, т. е. по реакции работающей САР [15]. Подобные задачи идентификации в замкнутом контуре регулирования в процессе нормального функционирования системы рассматривались, например, в работах [15–18].

Известно, что динамические свойства большого числа объектов управления могут быть представлены с помощью математической модели следующей структуры:

$$a_0 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + x(t) = k_{об} U(t - \tau), \quad (1)$$

где $x(t)$ – управляемая координата; $U(t)$ – управляющее воздействие; t – время; τ – время запаздывания; $k_{об}$ – коэффициент передачи объекта; a_0 и a_1 – коэффициенты дифференциального уравнения.

В работе [14] задача параметрической идентификации модели (1) решается по экспериментальным кривым разгона объектов управления. В данном же случае эту задачу следует решить, используя переходную функцию работающей САР. Поэтому для отыскания динамических параметров объекта управления нужно использовать математическую модель всего контура регулирования, а не только уравнение (1). Дополним уравнение (1) математической моделью ПИ-регулятора, при этом будем считать, что она имеет вид:

$$U(t) = k_p \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt \right], \quad (2)$$

где $\varepsilon(t)$ – рассогласование; k_p , T_I – соответственно коэффициент передачи и время интегрирования регулятора. Здесь рассогласование $\varepsilon(t)$ вычисляется звеном сравнения системы стандартным образом, т. е. по формуле $\varepsilon(t) = x^{3Д}(t) - x(t)$, где $x^{3Д}(t)$ – заданное значение регулируемого технологического параметра. Возмущения по заданию и по нагрузке в модели контура регулирования (1)–(2) также реализуются известным образом [1–3].

Известно, что дифференциальное уравнение (1) описывает динамические свойства конкретного объекта управления с необходимой точностью только в том случае, если удовлетворительно определены коэффициенты a_0 , a_1 , $k_{об}$ и время запаздывания τ . Рассмотрим решение этой задачи на основе современных достижений теории идентификации [19, 20].

Пусть известна экспериментальная переходная функция САР, информация, содержащаяся в данной переходной функции, и структуру математической модели контура регулирования, представленную уравнениями (1) и (2), будем считать исходными данными для решения задачи идентификации динамических свойств объекта управления. В принципе вместо экспериментальной переходной функции может быть использована опытная реакция САР на любое возмущение как по заданию, так и со стороны регулирующего органа. Задачу идентификации сформулируем следующим образом: требуется найти такие значения коэффициентов a_0 , a_1 , $k_{об}$ и времени запаздывания τ , при которых критерий идентификации

$$I(a_0, a_1, k_{об}, \tau) = \sum_1^n [x^э(t_i) - x(t_i)]^2 \quad (3)$$

будет принимать минимальное значение. Здесь $x^э(t_i)$ – экспериментальное значение выхода объекта или, что то же самое, экспериментальное значение переходной функции САР; $x(t_i)$ – расчетное значение, определяемое по модели системы (1)–(2) для данного типа возмущающего воздействия; t_i – используемые при настройке моменты времени; n – число экспериментальных точек.

Данную задачу идентификации решали с помощью программы, реализующей метод покоординатного спуска, получающиеся при этом задачи одномерной минимизации решали с помощью подпрограммы, использующей метод золотого сечения. При этом для вычисления текущих значений критерия (3) в процессе поиска оптимальных параметров уравнения (1) использовали разработанные в [14] компьютерные алгоритмы расчета переходных процессов в САР при возмущении по заданию или при возмущении по нагрузке. Причем для численного интегрирования уравнение (1) применяли метод Рунге – Кутты с погрешностью, пропорциональной пятой степени шага по времени. Для этого дифференциальное уравнение (1) предварительно записывали в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка, т. е. в нормальной форме Коши. В связи с необходимостью обеспечения заданной точности расчета программа построена так, что между экспериментальными точками по времени укладывается целое число расчетных шагов.

Уравнение (2) для компьютерного использования представляли в дискретной форме, при вычислении интеграла применяли метод трапеций. С целью сокращения объема необходимых вычислений использовали рекуррентную форму дискретного представления уравнения (2), приведенную в работе [21]:

$$U(k) = U(k-1) + q_0 \cdot \varepsilon(k) + q_1 \cdot \varepsilon(k-1), \quad (4)$$

где k – номер расчетного шага по времени, $q_0 = k_p [1 + h / (2T_{И})]$, $q_1 = k_p [h / (2T_{И}) - 1]$, h – величина расчетного шага по времени.

При тестировании разработанных программ получили вполне приемлемые результаты. Для примера на рис. 2 приведена экспериментальная переходная характеристика САР давления в металлургической печи при возмущении по заданию. В этой системе настройки ПИ-регулятора были равны: $k_p = 1,256$ % хода ИМ/Па, $T_{И} = 3,436$ с. В результате решения задачи идентификации по данным этой кривой были получены следующие значения параметров дифференциального уравнения (1): $a_0 = 1,709$ с², $a_1 = 1,404$ с, $\tau = 1,200$ с, $k_{об} = 0,906$ Па /% хода ИМ. Расчет по модели (1)–(2) при данных значениях параметров регулятора и объекта управления показал, что среднеквадратическое отклонение расчетной переходной характеристики контура регулирования от экспериментальной кривой $\sqrt{I/n}$ составило 0,012 Па, что вполне приемлемо.

На рис. 3 приведена экспериментальная переходная характеристика той же САР, только при возмущении по нагрузке. По данным этой кривой были получены следующие значения параметров дифференциального уравнения (1): $a_0 = 1,564$ с², $a_1 = 1,680$ с, $\tau = 1,200$ с, $k_{об} = 0,906$ Па /% хода ИМ. Расчет по модели (1)–(2) при данных значениях параметров показал, что среднеквадратическое отклонение расчетной переходной характеристики контура регулирования от экспериментальной кривой $\sqrt{I/n}$ составило 0,010 Па, что вполне приемлемо. Различие найденных численных значений динамических параметров объекта также можно считать вполне удовлетворительным.

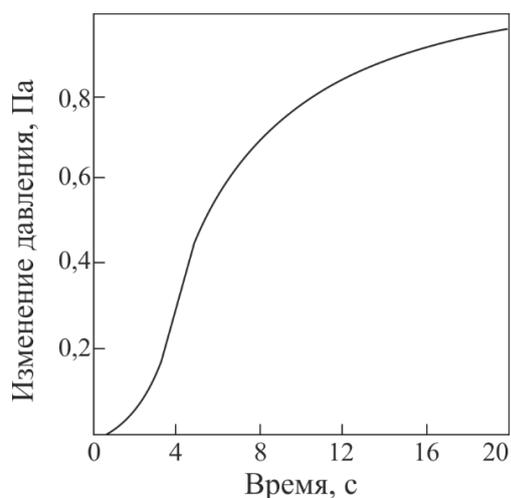


Рис. 2. Экспериментальная переходная характеристика САР давления в металлургической печи при возмущении по заданию

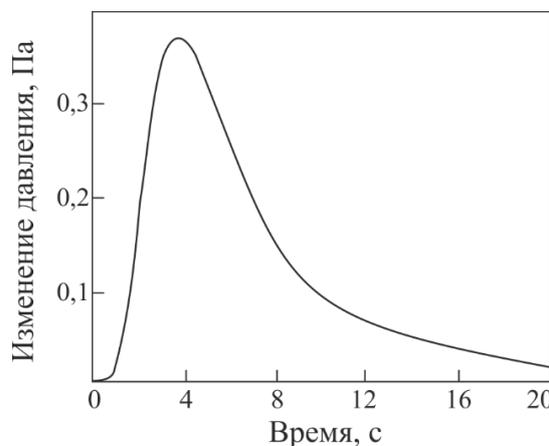


Рис. 3. Экспериментальная переходная характеристика САР давления в металлургической печи при возмущении по нагрузке

Следует заметить, что разработанная процедура настройки достаточно просто модифицируется для случая, когда вместо критерия (3) требуется минимизировать сумму модулей разностей расчетных и экспериментальных значений выходной координаты САР:

$$I(a_0, a_1, k_{об}, \tau) = \sum_1^n |x^{\mathcal{D}}(t_i) - x(t_i)|, \quad (5)$$

а также для случая минимаксной задачи: это когда требуется минимизировать максимальное отклонение расчетных значений от экспериментальных данных:

$$I(a_0, a_1, k_{об}, \tau) \Rightarrow \min_{a_0, a_1, k_{об}, \tau} \max_i |x^{\mathcal{D}}(t_i) - x(t_i)|. \quad (6)$$

Как известно, оценки параметров, найденные посредством минимизации критерия (3), являются наиболее правдоподобными с точки зрения нормального закона распределения ошибок,

а для случая критерия (5) – для распределения ошибок по закону Лапласа. Кроме того, вполне понятно, что использование интегральных критериев идентификации потребует незначительных изменений в разработанных программах.

После определения динамических параметров объекта управления задачу отыскания оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора можно решить с помощью компьютерных алгоритмов работы [14] либо по способу работ [22, 23].

Выводы

Рассмотрено решение задачи параметрической идентификации объекта управления по переходной функции работающей САР. Выполнена апробация разработанных программ по экспериментальным переходным характеристикам САР давления в металлургической печи. Указаны процедуры настройки регуляторов по найденным динамическим параметрам объекта. Результаты работы могут быть использованы при создании алгоритмического обеспечения современных многоуровневых АСУ ТП, на нижнем уровне которых применяются микроконтроллерные САР.

Литература

1. Копелович, А.П. *Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов* / А.П. Копелович. – М.: Металлургиздат, 1960. – 190 с.
2. *Проектирование систем контроля и автоматического регулирования металлургических процессов* / Г.М. Глинков, В.А. Маковский, С.Л. Лотман, М.Р. Шапировский. – М.: Металлургия, 1986. – 300 с.
3. *Основы теории и элементы систем автоматического регулирования* / В.Ю. Каганов, Г.М. Глинков, М.Д. Климовицкий, А.К. Климушкин. – М.: Металлургия, 1987. – 300 с.
4. Климовицкий, М.Д. *Регулирование объектов с переменными параметрами* / М.Д. Климовицкий // *Автоматика и телемеханика*. – 1965. – № 1. – С. 168–172.
5. Захарова, Е.В. *О стабилизации температуры в нагревательных печах периодического действия* / Е.В. Захарова, Е.А. Кочетков, В.К. Курилов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1982. – № 2. – С. 155–156.
6. Bristol, E.H. *Pattern recognition: An alternative to parameter identification in adaptive control* / E.H. Bristol // *Automatica*. – 1977. – Vol. 13. – P. 197–202. DOI: 10.1016/0005-1098(77)90046-2
7. Kraus, T.W. *Self-tuning PID controllers uses pattern recognition approach* / T.W. Kraus, T.J. Myron // *Control Engineering*. – June 1984. – P. 106–111.
8. Tachibana, K. *Single Loop Controller with Auto-Tuning System Using the Expert Method* / K. Tachibana, T. Suehito, T. Saito // *Hitachi Review*. – 1987. – Vol. 36, no. 7. – P. 357–362.
9. Ротач, В.Я. *Автоматизированная настройка ПИД-регуляторов – экспертные и формальные методы* / В.Я. Ротач // *Теплоэнергетика*. – 1995. – № 10. – С. 9–16.
10. Мань, Н.В. *Настройка регуляторов по переходной характеристике замкнутой системы с уточненной моделью объекта* / Н.В. Мань // *Теплоэнергетика*. – 1998. – № 7. – С. 55–58.
11. Ротач, В.Я. *Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования* / В.Я. Ротач. – М.: Энергия, 1973. – 300 с.
12. *Автоматизация настройки систем управления* / В.Я. Ротач, В.Ф. Кузицин, А.С. Ключев и др.; под ред. В.Я. Ротача. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 300 с.
13. Ротач, В.Я. *Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами* / В.Я. Ротач. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 300 с.
14. Панферов, В.И. *Численный расчет систем автоматического регулирования* / В.И. Панферов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1997. – № 4. – С. 66–68.
15. Панферов, В.И. *Оценка динамических свойств объекта управления по переходной функции замкнутой системы* / В.И. Панферов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1999. – № 10. – С. 54–56.
16. Штейнберг, Ш.Е. *Настройка и адаптация автоматических регуляторов. Инструментальный комплект программ* / Ш.Е. Штейнберг, И.Е. Залуцкий, Л.П. Серезжин // *Промышленные АСУ и контроллеры*. – 2003. – № 10. – С. 43–47.
17. Qiwen Yang. *Simultaneous PID self-tuning and control* / Qiwen Yang, Yuncan Xue, Jiao Huang // *Proceedings of the 2004 IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2–4 Sept. 2004*. – 2004. – P. 363–367. DOI: 10.1109/ISIC.2004.1387710

18. Ho, H.F. Adaptive PID controller for nonlinear system with H^∞ Physics and Control / H.F. Ho, Y.K. Wong, A.B. Rad // Proc. of International Conference, 20–22 Aug. 2003. – 2003. – Vol. 4. – P. 1315–1319.

19. Растринин, Л.А. Современные принципы управления сложными объектами / Л.А. Растринин. – М.: Сов. радио, 1980. – 300 с.

20. Эйхофф, П. Основы идентификации систем управления: пер. с англ. / П. Эйхофф. – М.: Мир, 1975. – 300 с.

21. Плютто, В.П. Практикум по теории автоматического управления химико-технологическими процессами. Цифровые системы / В.П. Плютто, В.А. Путинцев, В.М. Глумов. – М.: Химия, 1989. – 300 с.

22. Панферов, В.И. Об одном подходе к решению задачи выбора и настройки автоматических регуляторов / В.И. Панферов // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. – 2004. – Вып. 4 (26). – С. 139–144.

23. Панферов, В.И. Выбор и настройка автоматических регуляторов в системах теплоснабжения / В.И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2005. – Вып. 3, № 13 (53). – С. 81–84.

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

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

Халдин Константин Сергеевич, канд. техн. наук, программист, Targem Games, центр разработки компьютерных игр, г. Екатеринбург; lar3811@yandex.ru.

Поступила в редакцию 6 апреля 2019 г.

DOI: 10.14529/ctcr190305

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE MODEL OF OBJECT MANAGEMENT BY TRANSITIONAL FUNCTION WORKING SYSTEM AUTOMATIC REGULATION

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

S.V. Panferov¹, panferovsv@susu.ru,

K.S. Haldin³, lar3811@yandex.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² 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,

³ Targem Games, Computer Games Development Center, Ekaterinburg, Russian Federation

It is known that the dynamic properties of industrial objects in control channels usually change significantly with a change in their mode of operation. Therefore, the indicators of quality of regulation with constant settings of automatic regulators also change, and, as a rule, they deteriorate during

the operation of the units. In this connection, the problem arises of periodically adjusting the settings of regulators in the circuits of operating automatic control systems (ATS). This problem can be solved only by the actual dynamic parameters of the object being operated, therefore, the work considers the task of estimating these parameters, and according to the actual data of the operating closed system. In this case, a step perturbation is used either on the instructions or on the part of the regulator (on the load), the experienced reaction of the system to disturbances of any kind along the indicated channels can also be used. The control object is described by a second-order differential equation with delay. The parametric identification criterion is quadratic, either modular or minimax. The identification task is solved with the help of a program that implements the method of coordinate descent, the resulting one-dimensional minimization problems are solved with the help of a subroutine using the golden section method. For the numerical integration of the object equation, the Runge-Kutta method was used with an error proportional to the fifth power of the time step. In this paper, we tested the developed programs for parametric identification based on the experimental transient characteristics of ATS pressure in a metallurgical furnace. The numerical-analytical procedures for adjusting the regulators in the SAR by the found parameters of the control object are indicated.

Keywords: automatic controller, quality of regulation, transition function, closed automatic control system, variability of characteristics of the control object, parametric model identification, correction of controller settings.

References

1. Kopelovich A.P. *Inzhenernye metody rascheta pri vybore avtomaticheskikh regulyatorov* [Engineering Methods for Calculating the Choice of Automatic Regulators]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1960. 190 p.
2. Glinkov G.M., Makovskiy V.A., Lotman S.L., M.R. Shapirovskiy M.R. *Proektirovanie sistem kontrolya i avtomaticheskogo regulirovaniya metallurgicheskikh protsessov: uch. posobie* [Designing Control Systems and Automatic Control of Metallurgical Processes: Tutorial]. Moscow, Metallurgy Publ., 1986. 352 p.
3. Kaganov V.Yu., Glinkov G.M., Klimovitsky M.D., Klimushkin A.K. *Osnovy teorii i elementy sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Fundamentals of the Theory and Elements of Automatic Control Systems]. Moscow, Metallurgy Publ., 1987. 300 p.
4. Klimovitsky M.D. [Regulation of Objects with Variable Parameters]. *Automatics and Telemechanics*, 1965, no. 1, pp. 168–172. (in Russ.)
5. Zakharova E.V., Kochetkov E.A., Kurilov V.K. [About Stabilization of Temperature in Heating Furnaces of Periodic Action]. *News of Higher Education Institutions Ferrous Metallurgy*, 1982, no. 2, pp. 155–156. (in Russ.)
6. Bristol E.H. Pattern Recognition: On Alternative to Parameter Identification in Adaptive Control. *Automatic*, 1977, vol. 13, pp. 197–202. DOI: 10.1016/0005-1098(77)90046-2
7. Kraus T.W., Myron T.J. Self-Tuning PID Controllers Uses Pattern Recognition Approach. *Control Engineering*, June 1984, pp. 106–111.
8. Tachibana K., Suehito T., Saito T. Single Loop Controller with Auto-Tuning System Using the Expert Method. *Hitachi Review*, 1987, vol. 36, no. 7, pp. 357–362.
9. Rotach, V.Ya. [Automated Tuning of PID-regulators – Expert and Formal Methods]. *Thermal Engineering*, 1995, no. 10, pp. 9–16. (in Russ.)
10. Man N.V. [Adjustment of Regulators on the Transient Response of a Closed System with a Refined Object Model]. *Thermal Engineering*, 1998, no. 7, pp. 55–58. (in Russ.)
11. Rotach, V.Ya. *Raschet dinamiki promyshlennykh avtomaticheskikh sistem regulirovaniya* [Calculation of the Dynamics of Industrial Automatic Control Systems]. Moscow, Energy Publ., 1973. 300 p.
12. Rotach V.Ya., Kuzishchin V.F., Klyuev A.S. and others *Avtomatizatsiya nastroyki sistem upravleniya* [Automation of Control System Settings]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 300 p.
13. Rotach V.Ja. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic Control Theory: Textbook for High Schools]. Moscow, Publ. MEI, 2004. 400 p.
14. Panferov V.I. [The Numerical Calculation of Automatic Control Systems]. *News of Higher Education Institutions Ferrous Metallurgy*, 1997, no. 4, pp 26–28. (in Russ.)

15. Panferov V.I. [Estimate of Dynamic Properties of a Control Object on the Transfer Function of the Closed System]. *News of Higher Education Institutions Ferrous Metallurgy*, 1999, no. 10, pp. 54–56. (in Russ.)
16. Steinberg Sh. E., Zalutsky I. E., Seregin L. P. [Setting and Adaptation of Automatic Controllers. Tool Set of Programs]. *Industrial Control Information System and Controllers*, 2003, no. 10, pp. 43–47. (in Russ.)
17. Qiwen Yang, Yuncan Xue, Jiao Huang. Simultaneous PID Self-Tuning and Control. *Proc. of the 2004 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, 2–4 Sept. 2004, pp. 363–367. DOI: 10.1109/ISIC.2004.1387710
18. Ho H.F., Wong Y.K., Rad A.B. Adaptive PID Controller for Nonlinear System with H^∞ Physics and Control. *Proc. of International Conference*, 20–22 Aug. 2003, vol. 4, pp. 1315–1319.
19. Rastrigin L.A. *Sovremennyye printsipy upravleniya slozhnymi ob'yektami* [Modern Principles of Control of Complex Objects]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1980. 300 p.
20. Eykhhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniya*. [Fundamentals of Identification of Control Systems]. Moscow, Mir Publ., 1975. 300 p.
21. Plutto V.P., Putintsev V.A., Glumov V.M. *Praktikum po teorii avtomaticheskogo upravleniya khimiko-tekhnologicheskimi protsessami. Tsifrovyye sistemy* [Workshop on the Theory of Automatic Control of Chemical-Technological Processes. Digital Systems]. Moscow, Chemistry Publ., 1989. 300 p.
22. Panferov V.I. [On One Approach to Solving the Problem of Choosing and Setting Automatic Regulators]. *Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2004, no. 04 (26), pp. 139–144. (in Russ.)
23. Panferov V.I. [Selection and Adjustment of Automatic Regulators in Heating Systems]. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Construction and Architecture*, 2005, vol. 3, no. 13 (53), pp. 81–84. (in Russ.)

Received 6 April 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Панферов, В.И. Параметрическая идентификация модели объекта управления по переходной функции работающей системы автоматического регулирования / В.И. Панферов, С.В. Панферов, К.С. Халдин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 52–59. DOI: 10.14529/ctcr190305

FOR CITATION

Panferov V.I., Panferov S.V., Haldin K.S. Parametric Identification of the Model of Object Management by Transitional Function Working System Automatic Regulation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 52–59. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190305

VERIFICATION OF KOLMOGOROV EQUATION USABILITY FOR REPRODUCTION AND DEATH PROCESSES

A.V. Zatonkiy, zxenon@narod.ru

*Perm National Research Politechnic University, Berezniki branch, Berezniki,
Perm region, Russian Federation*

A simulation is widely used as a basis for decision support systems. Many production systems may be considered as queuing systems if a time of processes more valuable than their physical meaning. Program models realized queuing systems are used in a planning and in optimization targets. But results of program simulation are not suitable for scientific qualification works according to traditions. Analytical conclusions are made using Kolmogorov's equations and some models derived from the one usually. But a question about possibility of using them with widespread statistical distributions is not quite explored. In this article we investigate a possibility of using the Kolmogorov's equations on a simple reproduction and death queuing system with some distributions. Numerical data is obtained from program models realized in GPSS and AnyLogic. Theoretical results in comparison with numerical data lead us to a conclusion. The possibility is present only when all statistical distributions in the model are exponential or very close to exponential. Else average error between the theory and the model is above 60%. So far as a small experimental data typical for observations in production systems does not allow to determine own statistical distribution surely, an uniform distribution is accepted as default, and Kolmogorov's equations could not be used.

Keywords: Kolmogorov equations, simulation modeling, queuing system.

Introduction

Simulation of queuing systems (QS) is an effective tool for researching of production systems. Many foreign [1, 2] and Russian [3, 4] sources show the effectiveness of use of simulation in a study and optimization of activities of enterprises and their subdivisions. In particular, it is shown that queuing and multi-agent modeling is an effective in a decision support systems of a production management [5]. Let's notice that the multi-agent system (MAS) is a simulation model in which objects ("agents") are characterized by some autonomy, decentralization and limited ideas [6]. Extremely autonomy and limitations are characteristic of channels and transacts of QS. Software agents of MAS are described by algorithms of their own actions and interactions with other software agents.

Statistical distribution of random variables has a great influence on the modeling results. As shown in [7] a model of joint works of titanium plant subdivisions gives very different results in case of uniform or Poisson distributions (Fig. 1).

The specific units of reaction and factors do not matter in this case. The non-linear relationship between the reactions with normal and Poisson distributions of the factor is important. This dependence is also characteristic of other queuing systems. The uniform distribution is "worst" in some manner. It provides biggest deviations of a result value of any QS. Meanwhile the uniform distribution is assumed by default exactly when no reliable information in an input data. The Gaussian distribution could be used customarily when it can be confirmed by statistical testing of the hypothesis.

Using of conclusions obtained solely through the use of simulation programs (QS) is considered insufficient in qualifying scientific jobs (thesis). Famous methodologist of dissertation research in Russia considers [8] that "...an idea and technique of simulation is so simple that you can learn it of some days in a matter. Therefore, use of them ... cannot be a confirmation of the high qualification of a thesis". The scientific tradition requires supplementing QS calculations with analytical research.

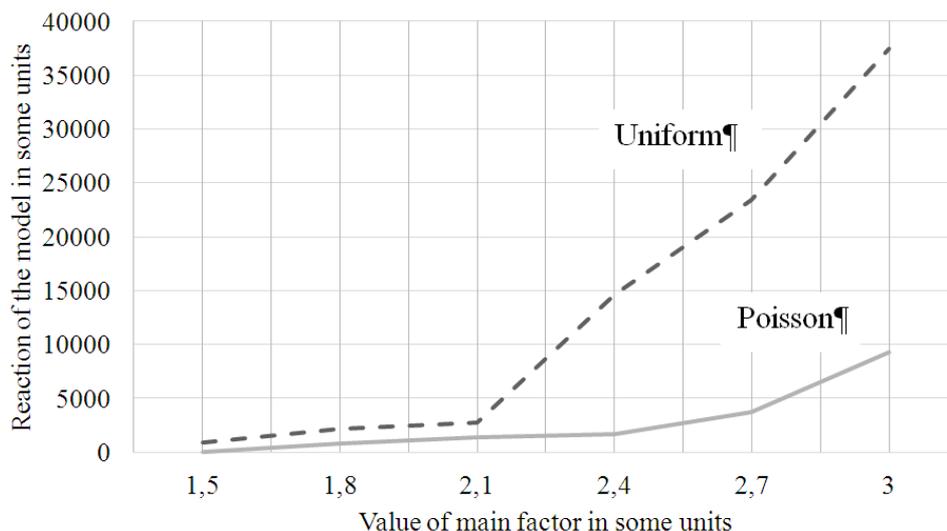


Fig. 1. Dependences between the factor and the reaction of the model with different statistical distributions of the random factor variable

Kolmogorov’s equation and many models generated by such approach are one of the most common mathematical tools for the research of QS. A main idea of the method is in follow. A velocity of Markov processes state changing is determined by probabilities of neighboring states and the flows of their changes:

$$\begin{cases} \frac{dp_i(t)}{dt} = \sum_{j \neq i} \lambda_j p_j(t), \\ \sum_i p_i(t) = 1, \end{cases}$$

where $p_i(t)$, $p_j(t)$ – probabilities of i -th and j -th states of QS in time t , λ_j – change state flow from i -th state to j -th ($\lambda_j > 0$) or vice versa ($\lambda_j < 0$). Thus, it is possible to calculate the limit probabilities of the state of the system when $\frac{dp_i(t)}{dt} = 0 \forall i$.

However, it is obvious that the Kolmogorov’s equations are not valid for all statistical distributions. Let consider the simplest model of “death and reproduction” as one-channel QS with a limited queue. If a loading flow λ is smaller of an unloading flow μ , we can get a solution of the Kolmogorov equations as the probability of an empty queue $p_0 = 1 - \rho$ [9], where $\rho = \frac{\lambda}{\mu} < 1$. That means the queue will not be empty at any time. At the same time, if zero dispersion of the loading and unloading flows is observed, queue will be empty forever. You can easily imagine it if transacts arrives exactly via $\frac{1}{\lambda}$ time

units and being processed in a channel exactly $\frac{1}{\mu}$ t.u., where $\frac{1}{\mu} < \frac{1}{\lambda}$. So if we calc a production system

as QS by the Kolmogorov’s equations we can obtain a wrong result if some factors has uniform distributions. That is why a question about validity of the Kolmogorov’s equations is ambiguous and practically important in relation to the statistical distributions of the intensity of loading flows and their processing. The problem of studying of the usability limits of the Kolmogorov’s equations and similar mathematical models is usually not considered in scientific sources (for example [10, 11]) despite the obvious need to solve it.

We attempt to experimentally “verify” the Kolmogorov’s equations using some common different simulation environments in this article. We will make a theoretical calculation of the limiting state probabilities of QS “death and reproduction” and their comparison with the results experimentally obtained

by GPSS World and AnyLogic programs. As examples two schemes is considered: a multichannel system with failures (the so-called Erlang problem), and a single-channel system with a limited queue.

Multichannel QS with failures

Let us consider a system includes three channels to process of transacts. Let a medium loading flow intensity is equal $\lambda = 0,005 \text{ s}^{-1}$, and processing (unloading) flow intensity is equal $\mu = 0,0025 \text{ s}^{-1}$. The system has four states: S_0 – all channels are free, S_1 – one channel is free but others are busy and so on until S_3 . Let $p_0 \dots p_3$ are probabilities of the states $S_0 \dots S_3$ respectively, $p_0(t) = 1$, $p_i(t) = 0 \quad \forall i = \overline{1,3}$. A state graph of the system is presented on Fig. 2.

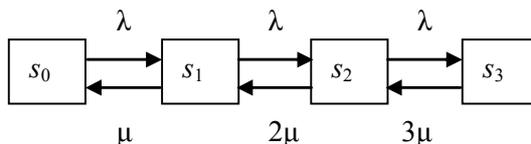


Fig. 2. A state graph of three-channel QS with a queue

The flow of transacts leads the system from any left state to the next right one with the same intensity λ sequentially. An unload intensity leads the system from left to the next right state. The last depends on state of the system (from a number of busy channels). For example, the system can turn from state S_2 to S_1 if any of channels (1 or 2) will terminate the processing. That is why a summary unload flow is equal 2μ .

So, the system of Kolmogorov's equations is a follow in a limit stationary mode:

$$\begin{cases} \lambda \cdot p_0 = \mu \cdot p_1, \\ \lambda \cdot p_1 = 2 \cdot \mu \cdot p_2, \\ \lambda \cdot p_2 = 3 \cdot \mu \cdot p_3, \\ p_0 + p_1 + p_2 + p_3 = 1. \end{cases}$$

Probabilities $p_0 \dots p_3$ is equal consequently:

$$p_0 = \left(1 + \frac{\lambda}{\mu} + \frac{\lambda^2}{2! \mu^2} + \frac{\lambda^3}{3! \mu^3} \right)^{-1} = 0.1579, \quad p_1 = \frac{\lambda \cdot p_0}{\mu} = 0.3158,$$

$$p_2 = \frac{\lambda \cdot p_1}{2 \cdot \mu} = \frac{\lambda^2 \cdot p_0}{2 \cdot \mu^2} = 0.3158, \quad p_3 = \frac{\lambda \cdot p_2}{3 \cdot \mu} = \frac{\lambda^3}{6 \cdot \mu^3} p_0 = 0.2105.$$

Single-channel QS with a queue

Let us consider a single-channel QS with a three cells queue and the same flow rates. The system has 5 possible states: S_0 – the channel is free, a length of the queue is 0, S_1 – the channel is busy, the queue is free, S_2 – the channel is busy and the length of the queue is 1 and so on until S_4 – both the channel and the queue are full. Probabilities of the states are $p_0 \dots p_4$, beginning conditions are $p_0(t) = 1$, $p_i(t) = 0 \quad \forall i = \overline{1,4}$. A state graph of such system is similar to Fig. 2 but an unload flow rate is μ at any state.

So, the system of Kolmogorov's equations is a follow in a limit stationary mode:

$$\begin{cases} p_0 = (1 + \rho + \rho^2 + \rho^3 + \rho^4)^{-1} = 0.5161, \\ p_1 = \rho \cdot p_0 = 0.2581, \\ p_2 = \rho^2 \cdot p_0 = 0.1290, \\ p_3 = \rho^3 \cdot p_0 = 0.06452, \\ p_4 = \rho^4 \cdot p_0 = 0.03226, \end{cases}$$

where $\rho = \lambda/\mu = 0.5$.

Modeling program and results

We designed two programs to solve both tasks: one by GPSS (General Purpose Simulation System) language and second in AnyLogic modeling suite. We can create some distributions in GPSS using libraries or using tables with points of the distribution function [5]. We used different kinds of statistical distributions to determinate whether they could be coincided with result of Kolmogorov’s equations solving:

- Uniform;
- Normal;
- Gamma;
- Exponential;
- Weibull;
- Geometric.

Some of them are presented in GPSS/AnyLogic libraries, another are realized with table functions. All results and theoretical results above are in Table 1. Distributions marked “*” is the same but with modified parameters described below. A GPSS listing for multi-channel QS with failures is the follow:

```

; ===== main block =====
kan storage 3 ; 3 channels
generate (Normal(1,200,0.01)) ; a kind of distribution
gate snf kan,out
enter kan
advance (Normal(1,400,0.01))
leave kan
terminate
out terminate
;===== secondary flow to computation =====
generate 1 ; secondary flow
savevalue 1,S$kan ; a current content of the storage
test e x1,0,met1 ; if the channel is free, then +1,
; else go to met1
savevalue empty+,1 ; count if the channel is free
terminate 1
;-----
met1 test e x1,1,met2
savevalue full1+,1 ; a channel 1 is busy
terminate 1
;-----
met2 test e x1,2,met3
savevalue full2+,1 ; two channels are busy
terminate 1
;-----
met3 test e x1,3
savevalue full3+,1 ; all channels are busy
terminate 1
start 1000000
    
```

Table 1

Comparison of simulation results in GPSS with theoretical conclusions

Stochastic distribution	Multi-channel QS with failures				Single-channel QS with a queue				
	p_0	p_1	p_2	p_3	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4
Bu Kolmogorov’s equations	0.1579	0.3158	0.3158	0.2105	0.5161	0.2581	0.1290	0.06452	0.03226
Uniform	0.0244	0.2237	0.6047	0.1689	0.7252	0.2714	0.0003	0.0003	0.0003
Normal	0.0002	0.00029	0.999	0.000089	0.5008	0.4959	0.0004	0.0002	0.0002
Gamma	0.1587	0.3172	0.3148	0.2083	0.5072	0.2566	0.1342	0.0679	0.0316
Exponential	0.1587	0.3171	0.3148	0.2084	0.5072	0.2566	0.1342	0.0679	0.0316
Weibull	0.1587	0.3171	0.3148	0.2084	0.5072	0.2566	0.1342	0.0679	0.0316
Geometric	0.1527	0.3136	0.3234	0.2090	0.5165	0.2591	0.1275	0.0641	0.0303

Инфокоммуникационные технологии и системы

Numbers of states are stored in variables Empty and Full. They are counted by a special flow from a block “generate 1” when the model works. Probabilities are the numbers divided on their sum.

An analogue program is designed for the single-channel QS with a limited queue. All changes was only in a follow block:

```

nak    storage 3
      generate (Normal(1,200,0.01)) ; a kind of distribution
      gate snf nak,out    ; if no space in 'nak', then 'out'
      enter nak
      seize kan
      leave nak
      advance (Normal(1,400,0.01))
      release kan
      terminate

out    terminate
    
```

Both models are realized in AnyLogic too [12]. For example the single-channel QS with a limited queue is shown on Fig. 3. Results of modeling with different distributions are shown in Table 2.

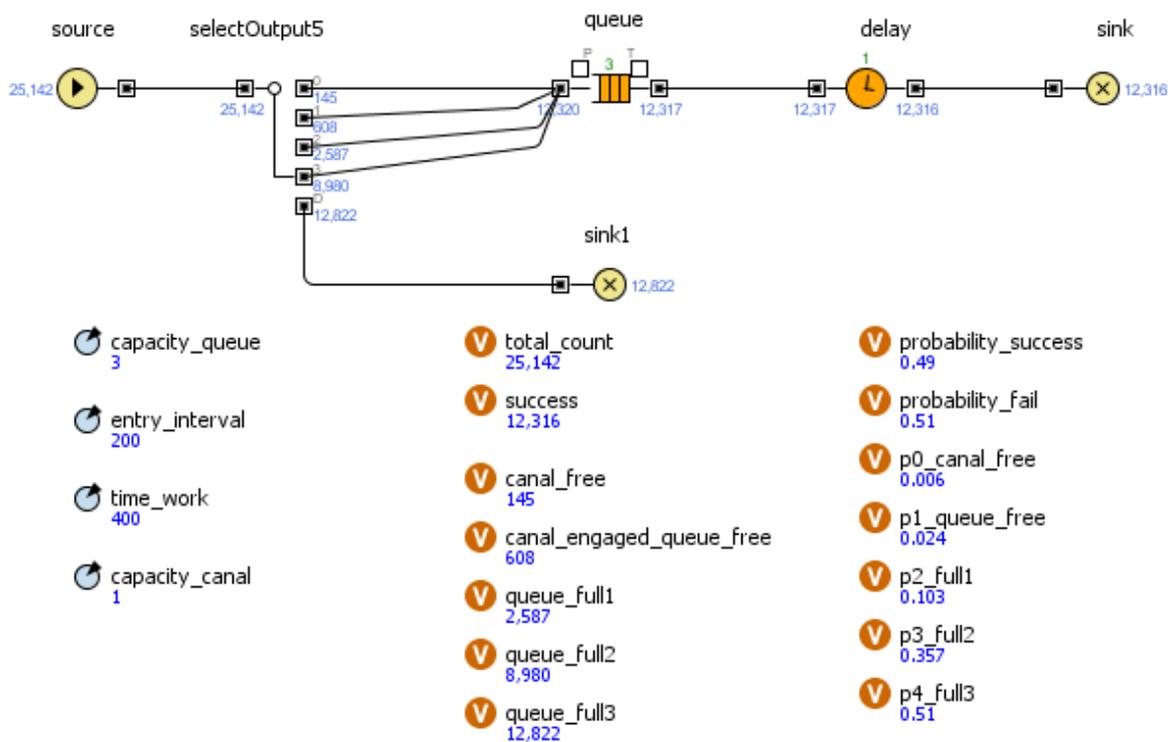


Fig. 3. The model and results of modeling with an exponential distribution for single-channel QS with a limited queue

Table 2
Comparison of simulation results in AnyLogic with theoretical conclusions

Stochastic distribution	Multi-channel QS with failures				Single-channel QS with a queue				
	p_0	p_1	p_2	p_3	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4
Bu Kolmogorov's equations	0.1579	0.3158	0.3158	0.2105	0.5161	0.2581	0.1290	0.06452	0.03226
Uniform	0.007	0.523	0.44	0.03	0.501	0.499	3.9E-05	1.9E-05	1.9E-05
Normal	0.00002	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0.00004	0.00002	0.00002
Gamma	0.156	0.315	0.317	0.211	0.516	0.259	0.13	0.064	0.031
Exponential	0.155	0.318	0.317	0.21	0.516	0.259	0.13	0.064	0.031
Weibull	0.155	0.318	0.317	0.21	0.516	0.259	0.13	0.064	0.031
Geometric	0.156	0.318	0.316	0.21	0.514	0.257	0.132	0.065	0.032
Erlang	0.155	0.318	0.317	0.21	0.516	0.259	0.13	0.064	0.031

A medium errors between results obtained with GPSS and AnyLogic with different distributions is in Table 3.

Table 3
Medium errors of modeling in different tools in comparison with Kolmogorov's equations

Distribution	GPSS, %	AnyLogic, %
Uniform	63,2	75,8
Normal	101,1	79,3
Gamma	1,8	0,9
Exponential	1,8	1,0
Weibull	1,8	1,0
Geometric	1,7	0,8
Erlang	–	1,0

There are no significant differences between using inbuilt or table functions of distributions calculations, if the last set correctly. For example, a error for inbuilt exponential distribution is 1,8% as shown above, and for table function is 2,6%.

Results and conclusion

As a result Kolmogorov's equation could be used for analytic QS modeling in tow cases:

1. If a stochastic distribution is exponential.

2. If other distributions are close to the one especially. For example, in built functions GAMMA(Stream, Locate, Scale, Shape), WEIBULL(Stream, Locate, Scale, Shape) etc. a parameter 'Shape' must be set to Shape = 1.

Otherwise results of modeling are very different from theoretical ones even in the simplest systems described here. They will be even more different in complex QS'. So far as uniform distribution is the default, results of production QS modeling cannot be compared with theoretical ones in any case. A scientist has to make sure in exponential kind of each stochastic parameter of QS before try to use common analytic modeling methods.

References

1. Brown, A.J. A Study of Queuing Theory in Low to High Rework Environments with Process Availability. *Manufacturing Systems Engineering*, 2015. Available at: https://uknowledge.uky.edu/ms_etds/2.
2. Bitrain G.R., Dasu S. *A Review of the Open Queueing Network Models of Manufacturing Systems*. WP #3229-90-MSA, 1990. 64 p. Available at: https://mafiadoc.com/a-review-of-the-open-queueing-network-models-semantic-scholar_59d9e8ef1723dd0ff54ccbd3.html.
3. *Mul'tiagentnyye sistemy dlya upravleniya proizvodstvom v real'nom vremeni* [Multi-Agent Systems for Production Management in Real Time] Available at: http://www.iki.rssi.ru/seminar/2011030204/presentation/20110303_04.pdf.
4. Zatonskiy A.V. Concentrating Plant Processing Section Modeling in MATLAB Package. *Obogashchenie Rud*, 2014, no. 4, pp. 49–54.
5. Skobelev P.O. Multi-Agent Technology in Industrial Applications. *Mechatronics, Automation, Control*, 2010, no. 12, pp. 33-46. (in Russ.)
6. E.V. Ivanova, A.V. Zatonsky [Assessment and Modeling Scientific Reserach Works of Students as Multi-agent System]. *Modern High Technologies*, 2009, no. 7, pp. 75-78. (in Russ.)
7. Zatonsky A.V., Ufimtseva C.N. [Design of Object Oriented Software to Multi-Agent Modeling of Enterprise Processes]. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Control, ADP Equipment and Information Science*, 2018, no. 4, pp. 56–62. (in Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2018-4-56-62
8. Ryzhikov Yu.I. *Rabota nad dissertatsiey po tekhnicheskim naukam* [Work on the Thesis on Technical Science]. St. Petersburg, BKHV-Peterburg Publ., 2005. 496 p.
9. Agal'tsov V.P., Voldayskaya I.V. *Matematicheskie metody v programmirovanii* [Mathematical Methods in Programming]. Moscow, FORUM Publ., 2006. 224 p.

10. Boev V.D. *Issledovanie adekvatnosti GPSS WORLD i AnyLogic pri modelirovanii diskretno-sobytiynykh protsessov*. [Research of Adequacy GPSS WORLD and AnyLogic when Modeling Discrete and Event Processes]. St. Petersburg, 2011. 404 p.

11. Zatonsky A.V., Tugashova L.G., *Modelirovanie ob"ektov upravleniya v MATLAB* [Modelling of Control Objects in MATLAB]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2019. 144 p.

12. *Modelirovanie nepreryvnykh sluchaynykh velichin – Imitatsionnoe modelirovanie na GPSS* [Modeling of Continuous Random Variables – Simulation Modeling on GPSS. Available at: http://www.codingrus.ru/readarticle.php?article_id=3131].

Received 15 April 2019

УДК 004.434

DOI: 10.14529/ctcr190306

ПРОВЕРКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УРАВНЕНИЯ КОЛМОГорова для РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ГИБЕЛИ И РАЗМНОЖЕНИЯ

А.В. Затонский

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

Моделирование широко используется в качестве основы для систем поддержки принятия решений. Многие производственные системы могут быть представлены в виде систем массового обслуживания, так как время обработки в них более существенно, чем сами технологические процессы. Программные модели, реализующие системы массового обслуживания, используются как для планирования, так и в целях оптимизации производства. Однако традиционно имитационное моделирование не считается применимым, если речь идет о создании нового научного результата, в частности, в научно-квалификационных работах. Аналитические выводы обычно опираются на уравнения Колмогорова или многочисленные модели, являющиеся производными от них. Однако остается открытым вопрос, можно ли так поступать при различных статистических распределениях случайных значений параметров. В этой статье исследуется применимость уравнения Колмогорова в простейшей системе массового обслуживания, модели гибели и размножения, с разными статистическими распределениями. Численные данные получены путем моделирования в средах AnyLogic и GPSS. Сравнение их с теоретическими выводами приводит к следующему практически важному результату. Обсуждаемая возможность появляется, только если статистические распределения являются экспоненциальными или близки к ним. При других распределениях расхождение между теоретическими результатами и результатами численного моделирования может достигать 60 %. Поскольку очень часто небольшое количество экспериментальных данных не позволяет обоснованно определить вид статистического распределения случайного числа, по умолчанию предполагается равномерное распределение. Однако в этом случае уравнения Колмогорова совершенно неприменимы для аналитического исследования системы.

Ключевые слова: уравнения Колмогорова, имитационное моделирование, системы массового обслуживания.

Литература

1. Brown, A.J. *A study of queuing theory in low to high rework environments with process availability* / A.J. Brown // *Manufacturing Systems Engineering*. – 2015. – https://uknowledge.uky.edu/ms_etds/2.

2. Bitran, G.R. *A Review of the Open Queueing Network Models of Manufacturing Systems* / G.R. Bitrain, S. Dasu. – WP #3229-90-MSA, 1990. – 64 p. Available at: https://mafiadoc.com/a-review-of-the-open-queueing-network-models-semantic-scholar_59d9e8ef1723dd0ff54ccbd3.html.

3. Мультиагентные системы для управления производством в реальном времени. – http://www.iki.rssi.ru/seminar/2011030204/presentation/20110303_04.pdf.
4. Zatonkiy, A.V. Concentrating plant processing section modeling in MATLAB package / A.V. Zatonkiy // *Obogashchenie Rud.* – 2014. – № 4. – P. 49–54.
5. Скобелев, П.О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях / П.О. Скобелев // *Мехатроника, автоматизация, управление.* – 2010. – № 12. – С. 33–46.
6. Иванова, Е.В. Оценка и моделирование научно-исследовательской работы студентов как многоагентной системы / Е.В. Иванова, А.В. Затонский // *Современные наукоемкие технологии.* – 2009. – № 7. – С. 75–78.
7. 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. DOI: 10.24143/2072-9502-2018-4-56-62
8. Рыжиков, Ю.И. Работа над диссертацией по техническим наукам / Ю.И. Рыжиков. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 496 с.
9. Агальцов, В.П. Математические методы в программировании / В.П. Агальцов, И.В. Волдайская. – М.: ИД «ФОРУМ», 2006. – 224 с.
10. Боев, В. Д. Исследование адекватности GPSS WORLD и AnyLogic при моделировании дискретно-событийных процессов. – СПб.: ВАС, 2011. – 404 с.
11. Затонский, А.В. Моделирование объектов управления в MATLAB / А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова. – СПб.: Лань, 2019. – 144 с.
12. Моделирование непрерывных случайных величин – Имитационное моделирование на GPSS. – http://www.codingrus.ru/readarticle.php?article_id=3131.

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

Поступила в редакцию 15 апреля 2019 г.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

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

FOR CITATION

Zatonkiy 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

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 621.317.39 + 681.586.6 + 681.2.08 + 669.15 : 669-157.8

DOI: 10.14529/ctcr190307

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ

М.Д. Белоусов

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Создание специализированных средств измерения для глубокой интеграции в современные цифровые АСУ ТП стало возможным только при использовании в измерительных преобразователях микропроцессорных устройств. Однако на сегодня улучшение основных характеристик средств измерения в современных системах АСУ ТП за счёт применения микропроцессоров в значительной степени исчерпано при существенном запасе производительности последних. Поэтому именно сейчас актуальной задачей дальнейшего совершенствования средств измерений является поиск новых вариантов создания интеллектуальных средств измерения.

В рамках этой задачи в статье исследованы функциональные схемы интеллектуальных измерительных преобразователей температуры и предложены алгоритмы оценки их метрологической исправности в процессе работы в современных АСУ ТП. Предложен, обоснован и проверен на эксперименте алгоритм оценки точности измерения термопреобразователя сопротивлений в процессе работы.

Ключевые слова: термосопротивление, статусы измерения, оценка состояния средства измерения.

Введение

Одной из основных задач АСУ ТП является процесс измерения и обработки информации о физических величинах, характеризующих производственные технологические процессы [1–3].

Создание высокопроизводительного и высокоэффективного производства, обладающего возможностью быстрой переналадки при переходе с управления одного типа изделия на другой [4, 5], необходимо для своевременных обоснованных принятий решения в сложных и взаимосвязанных процессах. В таких условиях производства многократно повышаются требования к достоверности измерительной информации. Это, в свою очередь, стало возможно с появлением интеллектуальных средств измерений.

Под интеллектуальными средствами измерения мы будем понимать средства измерения с функцией самоконтроля согласно ГОСТу [6]. Оценка состояния средств измерения в процессе работы позволяет повысить достоверность и точность измерения, увеличить межповерочный интервал [6–8], повысить качество функционирования АСУ ТП в целом.

В настоящее время в современных средствах измерения имеется существенный незадействованный резерв производительности встроенных микропроцессоров. Наиболее актуальной задачей использования этих вычислительных резервов для дальнейшего совершенствования средств измерений принято считать поиск новых вариантов создания интеллектуальных средств измерения [9–12].

Работы [13–24] касаются проблем самостоятельной оценки достоверности результатов измерения температуры в процессе эксплуатации. В приведенных источниках рассматриваются подходы и предлагаются варианты измерительных преобразователей и алгоритмы их работы. Возможности самодиагностики таких измерительных преобразователей предлагается реализовать, исходя из физических взаимосвязей измеряемых величин. Однако в этих работах недостаточно

освещены вопросы качественной оценки точности измерения и самостоятельной качественной оценки состояния средств измерения в процессе функционирования.

Актуальность проблем создания интеллектуальных средств измерения подтверждается большим количеством статей и введения ГОСТов [6–8] по данной тематике.

Целью настоящего исследования является создание алгоритма оценки точности измерений, присвоения статусов состояния термопреобразователей сопротивления.

1. Схемы интеллектуальных измерителей температуры на основе металлических сопротивлений

В предыдущих работах автора [25, 26] были исследованы две интеллектуальные схемы измерения температуры на основе термосопротивлений.

На рис. 1 изображена схема термометра термосопротивлений без опорного сопротивления.

Температуру можно вычислить двумя различными способами (1), (2). Температуру, измеренную первым способом, обозначим как $T1$, температуру, измеренную вторым способом, как $T2$:

$$X(T1) = \frac{R_{Tч1}(T1)}{R_{Tч2}(T1)}; \quad (1)$$

$$Y(T2) = \frac{\Delta U_{II}}{\Delta U_{II}} = \frac{I \cdot \Delta R_{II}}{I \cdot \Delta R_{II}} = \frac{\Delta R_{II}}{\Delta R_{II}} = \frac{\Delta T}{\Delta T} \approx \frac{R'_{II}(T2)|_{T2}}{R'_{II}(T2)|_{T2}}. \quad (2)$$

Параметр оценки состояния d можно рассчитать по формуле

$$d = T2_n - \frac{T1_n + T1_{n-1}}{2}, \quad (3)$$

где n – текущее измерение, а $n - 1$ – предыдущее измерение.

Фактически параметр d является разницей двух измеренных разными способами температур единого процесса, характеризуя абсолютные погрешности этих измерений.

Исследования показали целесообразность усовершенствования параметра оценки состояния d , используя данные по диапазону измерений. Для этого можно использовать усреднение по диапазону $|d_{cp}|$:

$$|d_{cp}| = \frac{\sum_{i=1}^n |d|}{n}. \quad (4)$$

Перспективным способом усовершенствования методов оценки состояния средства измерения является метод регуляризации. В работах [27, 28] был получен критерий Δ , определяемый выражением

$$|\Delta| = \frac{\max_k |\Delta_k|}{\max_k \text{ абс. погр }},$$

который также будем рассматривать как критерий оценки исправности средства измерения в некотором диапазоне измерений. Здесь $\max_k |\Delta_k|$ – максимальное по модулю значение Δ в диапазоне измерений, $\max_k \text{ абс. погр}$ – максимальная допустимая абсолютная погрешность в диапазоне измерений, k – набор отсчетов.

Параметр Δ_k здесь также фактически является разницей двух измеренных разными способами температур единого процесса, характеризуя абсолютные погрешности этих измерений.

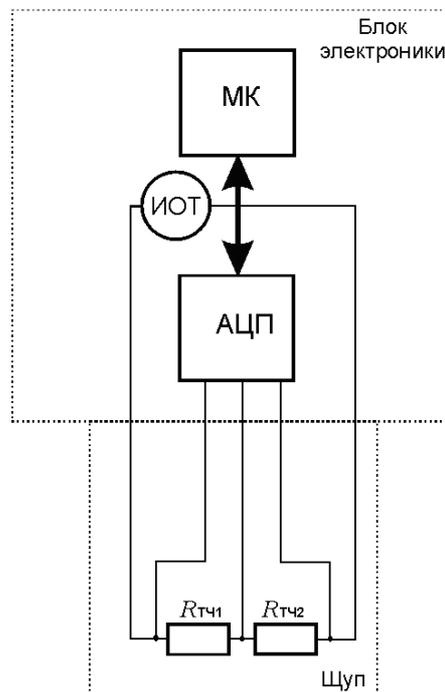


Рис. 1. Схема интеллектуального термометра сопротивления без опорного сопротивления

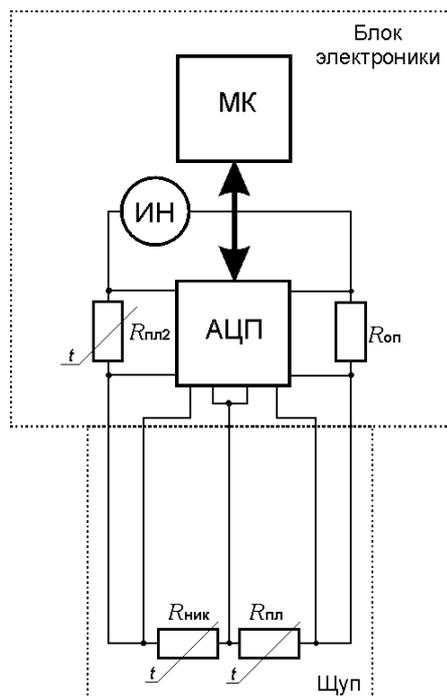


Рис. 2. Интеллектуальная схема термометра сопротивления с двумя измерительными преобразователями из различных металлов

Таким образом, для рассмотренной схемы также получены 2 независимых критерия оценки ее состояния.

2. Метод оценки состояния с помощью параметра D и результаты измерений для предложенных схем

Приведенный выше критерий *d* основан на усреднении полученных оценок в диапазоне измерений, поэтому с его помощью наиболее достоверными оказываются оценки систематической погрешности измерений. Приведенный выше критерий Δ основан на экстремальных оценках диапазона измерений, соответственно, с его помощью наиболее достоверно оцениваются отдельные наибольшие погрешности диапазона измерений. Для более точного принятия решения о выходе измерительного преобразователя температуры за пределы допустимой погрешности предлагается объединить оба критерия в единый критерий *D*:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \frac{|d_{cp}|}{|d_{cp,пор}|} + \frac{1}{2} \cdot \frac{|\Delta|}{|\Delta_{пор}|} \tag{8}$$

Применим полученные критерии для присвоения статусов результатам измерений.

ГОСТы [6–8] определяют статусы измерений, рассмотрим основные из них: подтвержденный, нормальный, ориентирующий, недостоверный. Алгоритмы расчета граничных пороговых значений $|d_{cp}|$ и Δ между статусами измерения для обеих рассматриваемых схем на основе методов имитационного моделирования были рассмотрены автором данной статьи в [25], результаты приведены в табл. 1 и 2. Там же приведены пороговые значения и для статуса *D*.

Таблица 1
Соответствие оценки критериев $d_{cp,пор}$ и Δ для схемы без опорного сопротивления

Статус измерений	$ d_{cp,пор} , ^\circ C$	$ \Delta_{пор} $	<i>D</i>
Подтвержденный	< 0,023	< 0,035	< 0,49
Нормальный	0,023...0,0467	0,035...0,71	0,49...1
Ориентирующий	0,0467...0,093	0,071...0,176	1...2,23
Недостоверный	> 0,093	> 0,176	> 2,23

Таким образом, для рассмотренной схемы получены 2 независимых критерия оценки ее состояния.

На рис. 2 изображена схема без опорного сопротивления.

Температуру можно вычислить двумя различными способами (5), (6). Температуру, измеренную первым способом, обозначим как *T1*, температуру, измеренную вторым способом, как *T2*:

$$R = R_{Tч1}(T1); \tag{5}$$

$$R = R_{Tч2}(T2). \tag{6}$$

Параметр оценки состояния *d* можно рассчитать по формуле

$$d = T2 - T1. \tag{7}$$

Параметры $|d_{cp}|$ и Δ для данной схемы измерения рассчитываются аналогично, из выражений (4) и (5).

Здесь *d* и Δ_к, как и в предыдущей рассмотренной схеме, также фактически являются характеристиками абсолютных погрешностей измерений.

Из предыдущих исследований был получен алгоритм расчета порогового критерия для выхода измерителя температуры за допустимые пределы для обоих параметров – $|d_{cp}|_{пор}$ и Δ_{пор}. При $|d_{cp}| > |d_{cp}|_{пор}$ или $|\Delta| > \Delta_{пор}$ принимается решение о выходе преобразователя температуры за пределы допустимой погрешности.

Таблица 2

Соответствие оценки критериев $d_{\text{ср. пор}}$ и Δ для схемы с двумя термопреобразователями
из различных металлов

Статус измерений	$ d_{\text{ср. пор}} , ^\circ\text{C}$	$ \Delta_{\text{пор}} $	D
Подтвержденный	$< 0,101$	$< 0,104$	$< 0,46$
Нормальный	$0,101 \dots 0,196$	$0,104 \dots 0,257$	$0,46 \dots 1$
Ориентирующий	$0,196 \dots 0,262$	$0,257 \dots 0,501$	$1 \dots 1,64$
Недостовверный	$> 0,262$	$> 0,501$	$> 1,64$

Далее рассмотрим результаты экспериментальной оценки.

3. Результаты экспериментальной оценки точности исследуемых измерительных преобразователей

3.1. Результаты экспериментальной оценки точности исследуемых измерительных преобразователей для схемы с двумя первичными преобразователями из различных металлов

Абсолютные и допустимые погрешности первичных преобразователей температуры для схемы с двумя первичными преобразователями из различных металлов с помощью объединяющего два разных метода параметра D представлены на рис. 3–5. Границы статусов промаркированы: границы статусов *подтвержденный* – *нормальный* ($\eta = 0,5$) – кружками, *нормальный* – *ориентирующий* ($\eta = 1$) – ромбами, *ориентирующий* – *недостовверный* ($\eta = 2$) – треугольниками.

Изображенная на рис. 3 оценка исправности характерна для средства измерения, находящегося в начале межповерочного интервала. Состояние средства измерения соответствует границе статусов *подтвержденный* – *нормальный*.

Изображенная на рис. 4 оценка исправности характерна для средства измерения, незначительно превысившего свой межповерочный интервал, что соответствует границе статусов *нормальный* – *ориентирующий*.

Изображенная на рис. 5 оценка исправности характерна для средства измерения, существенно превысившего свой межповерочный интервал. Данная ситуация соответствует границе статусов *ориентирующий* – *недостовверный*.

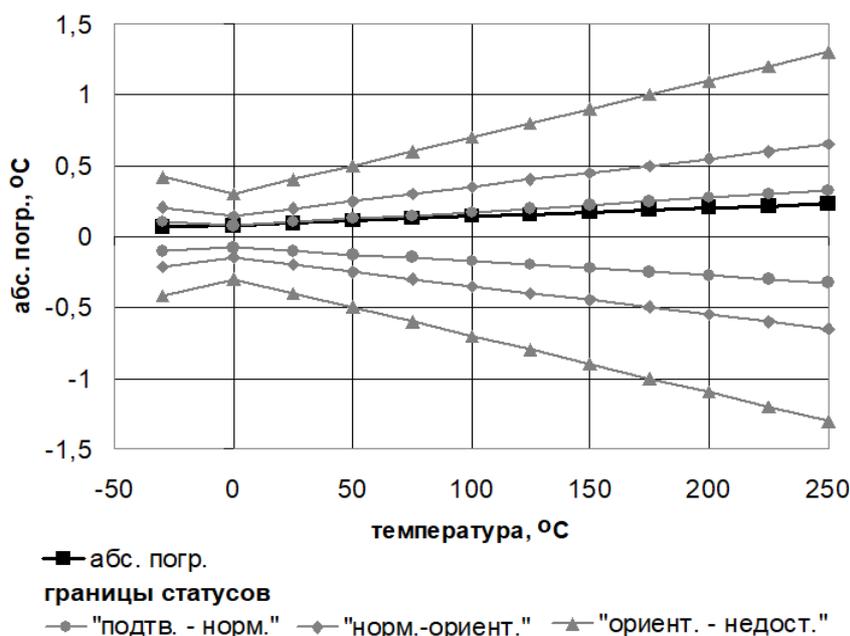


Рис. 3. Абсолютные и допустимые погрешности первичных преобразователей температуры для схемы с двумя первичными преобразователями из различных металлов. $D = 0,454$

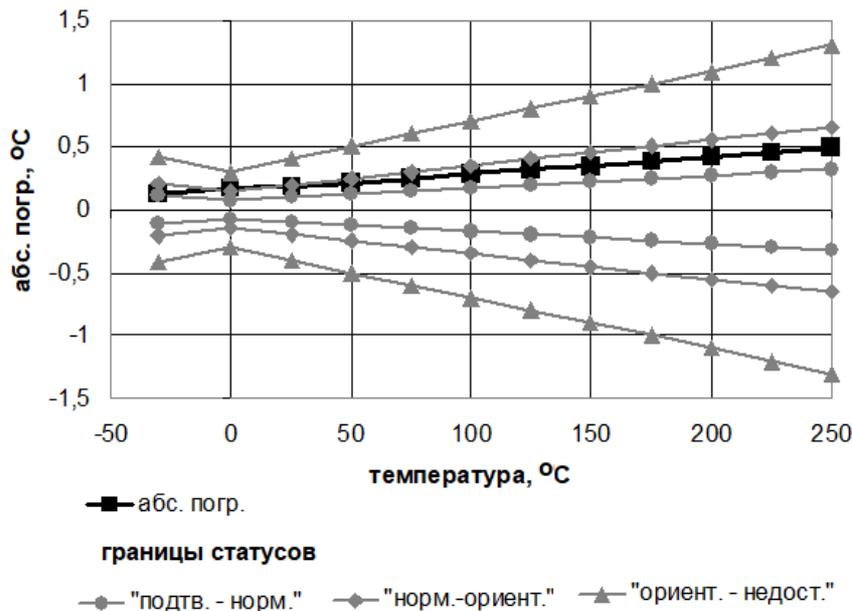


Рис. 4. Абсолютные и допустимые погрешности первичных преобразователей температуры для схемы с двумя первичными преобразователями из различных металлов. $D = 0,997$

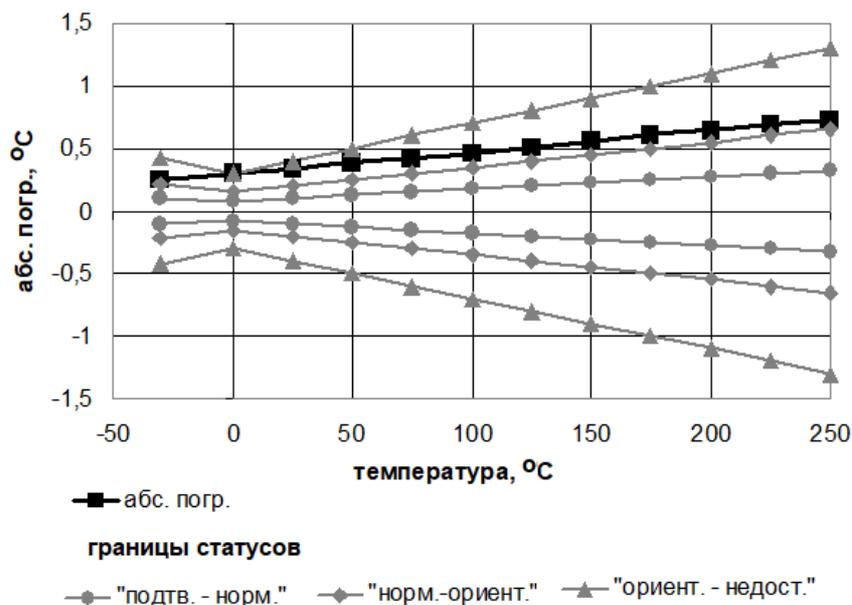


Рис. 5. Абсолютные и допустимые погрешности первичных преобразователей температуры для схемы с двумя первичными преобразователями из различных металлов. $D = 1,621$

Как видно из приведенных графиков, для схемы с двумя первичными преобразователями из различных металлов предложенный алгоритм оценки погрешности показал адекватность своей работы.

3.2. Результаты экспериментальной оценки точности исследуемых измерительных преобразователей для схемы с двумя первичными преобразователями для схемы без опорного сопротивления

Далее рассмотрим абсолютные и допустимые погрешности первичных преобразователей температуры с помощью объединяющего два разных метода параметра D для схемы без опорного сопротивления. Они представлены на рис. 6–8. Границы статусов здесь промаркированы: гра-

ницы статусов *подтвержденный – нормальный* ($\eta = 0,5$) – кружками, *нормальный – ориентирующий* ($\eta = 1$) – ромбами, *ориентирующий – недостоверный* ($\eta = 2$) – треугольниками.

Изображенная на рис. 6 оценка исправности характерна для средства измерения, находящегося в начале межповерочного интервала. Состояние средства измерения соответствует границе статусов *подтвержденный – нормальный*.

Изображенная на рис. 7 оценка исправности характерна для средства измерения, незначительно превысившего свой межповерочный интервал, что соответствует границе статусов *нормальный – ориентирующий*.

Изображенная на рис. 8 оценка исправности характерна для средства измерения, существенно превысившего свой межповерочный интервал. Данная ситуация соответствует границе статусов *ориентирующий – недостоверный*.

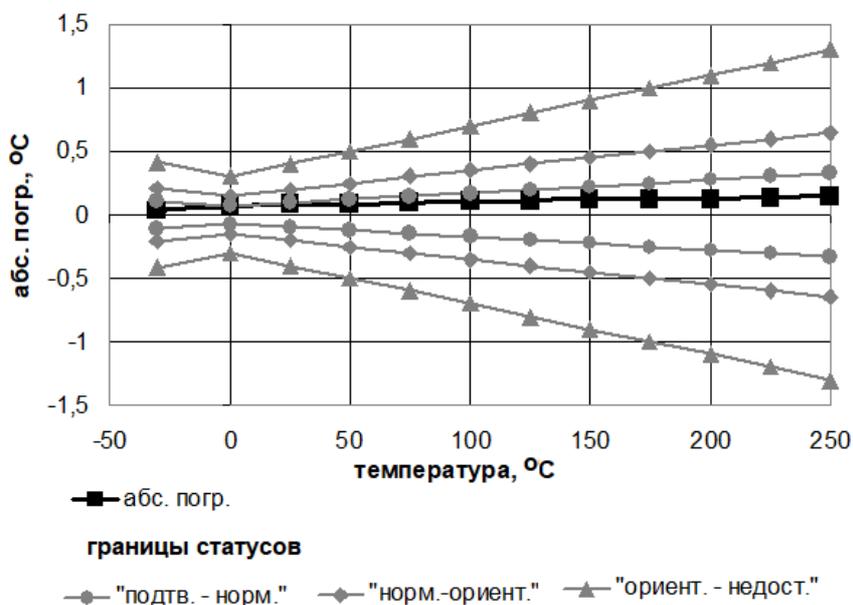


Рис. 6. Абсолютные и допустимые погрешности первичных преобразователей температуры для схемы без опорного сопротивления. $D = 0,489$

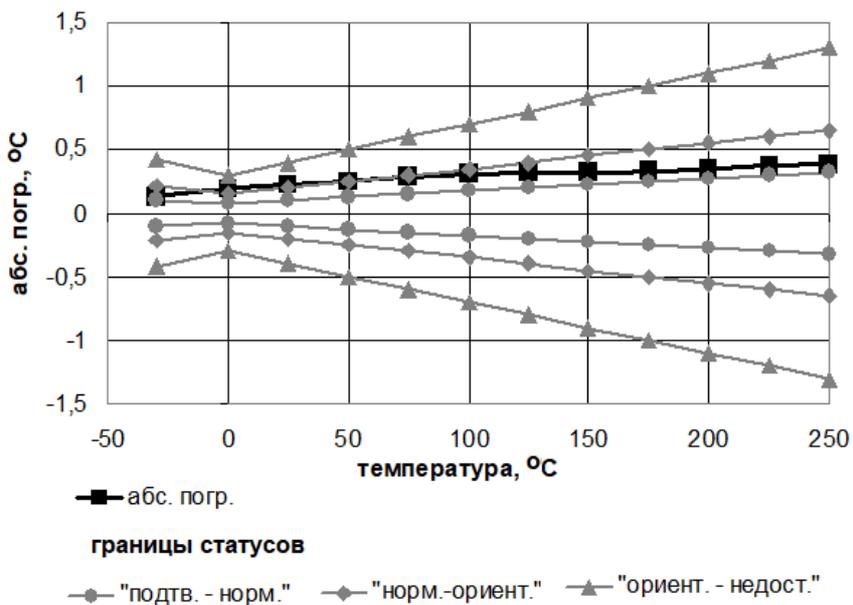


Рис. 7. Абсолютные и допустимые погрешности первичных преобразователей температуры для схемы без опорного сопротивления. $D = 0,99$

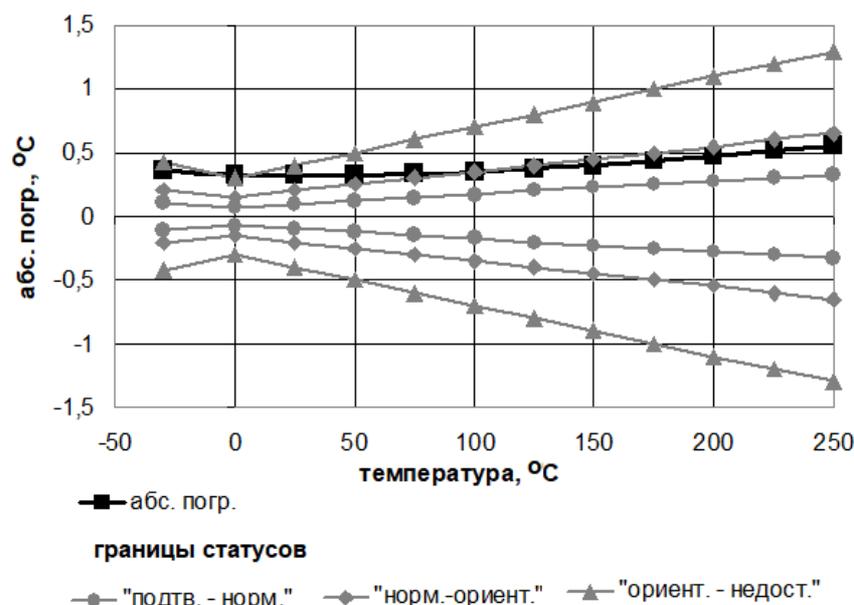


Рис. 8. Абсолютные и допустимые погрешности первичных преобразователей температуры для схемы без опорного сопротивления. $D = 2,224$

Как видно из приведенных графиков, для схемы без опорного сопротивления предложенный алгоритм оценки погрешности также показал адекватность своей работы.

Заключение

1. Рассмотрены две схемы измерительных преобразователей температуры на основе термосопротивлений: без опорного сопротивления и с двумя первичными преобразователями из различных металлов, обеспечивающие избыточность измерительной информации.

2. Для обеих рассмотренных схем введен параметр оценки состояния D , характеризующий величину абсолютной погрешности измерения, сформированный на основе двух разных методов, на основе параметров d и Δ_k .

3. Для обеих рассмотренных схем предложен алгоритм присвоения статусов состояния интеллектуальных измерительных преобразователей температуры на основе термосопротивлений.

4. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность предложенных в работе алгоритмов определения оценки исправности и присвоения статусов состояния для рассмотренных схем измерительных преобразователей.

Литература

1. Тайманов, Р.Е. Метрологический самоконтроль датчиков / Р.Е. Тайманов, К.В. Сапожникова // Сборник трудов Второй российской конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения (теория, методы, алгоритмы, исследования и разработки)». – М.: ИПУ РАН, 2010. CD-ROM.

2. Джонсон, Р. Системы и руководство (Теория систем и руководство системами) / Р. Джонсон, Ф. Каст, Д. Розенцверг. – Изд. 2-е, доп. – М.: Советское радио, 1971. – 650 с.

3. Ицкович, Э.Л. Оперативное управление непрерывным производством / Э.Л. Ицкович, Л.Р. Сорокин. – М.: Наука, 1989. – 155 с.

4. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учеб. для вузов / Н.М. Капустин, П.М. Кузнецов, А.Г. Схиртладзе и др.; под ред. Н.М. Капустина. – М.: Высшая школа, 2004. – 415 с.

5. Тучинский, С.В. Использование контроллеров серии БАЗИС при поэтапной модернизации производства / С.В. Тучинский, И.Н. Андриянов // Технические и программные средства систем автоматизации. Промышленные контроллеры в энергетике. – 2011. – № 5 (22). – С. 19–24.

6. ГОСТ Р 8.673–2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики

интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 8 с.

7. ГОСТ Р 8.734–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля. – М.: Стандартинформ, 2012. – 20 с.

8. ГОСТ Р 8.825–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы ускоренных испытаний. – М.: Стандартинформ, 2013. – 10 с.

9. Раннев, Г.Г. Интеллектуальные средства измерений: учеб. для студентов высш. учеб. заведений / Г.Г. Раннев. – М.: Издат. центр «Академия», 2011. – 272 с.

10. Романов, В.Н. Интеллектуальные средства измерений / В.Н. Романов, В.С. Соболев, Э.И. Цветков; под ред. Э.И. Цветкова. – М.: Татьяна день, 1994. – 280 с.

11. Концепция «Идеальный завод (VigilantPlant)» от компании «Йокогава». – <http://www.yokogawa.com/business/vigilantplant/index.htm>.

12. Каталог датчиков температуры компании «Метран». – <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Metran%20Documents/Catalog/Catalogues/Датчики-температуры-каталог.pdf>.

13. Новый этап в развитии метрологического обеспечения датчиков / Ю.В. Тарбеев, А.Ю. Кузин, Р.Е. Тайманов, А.Л. Лукашев // Измерительная техника. – 2007. – № 3. – С. 69–72.

14. Meijer, G.C.M. Smart Sensor Systems / G.C.M. Meijer. – John Wiley & Sons, Ltd, 2008. DOI: 10.1002/9780470866931

15. A Self-Validating Digital Coriolis Mass-Flow Meter: An Overview / M.P. Henry, D.W. Clarke, N. Archer et al. // Control Engineering Practice. – 2000. – Vol. 8, iss. 5. – P. 487–506. DOI: 10.1016/S0967-0661(99)00177-X

16. Zhigang Feng. Design and Implementation of Self-validating Pneumatic Actuator Hardware System Based on DSP and MCU / Zhigang Feng, Meng Qiu // International Journal of Hybrid Information Technology. – 2014. – Vol. 7, no. 6. – P. 101–114. DOI: 10.14257/ijhit.2014.7.6.08

17. Ицкович, Э.Л. Современные интеллектуальные датчики общепромышленного назначения, их особенности и достоинства / Э.Л. Ицкович // Датчики и системы. – 2002. – № 2. – С. 42–47.

18. Duta, M. The Fusion of Redundant SEVA Measurements / M. Duta, M. Henry // Control Systems Technology, IEEE Transactions. – 2005. – Vol. 13, iss. 2122. DOI: 10.1109/TCST.2004.840448

19. Ларионов, В.А. Определение межповерочных интервалов для интеллектуальных датчиков технологических производств / В.А. Ларионов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 6. – С. 25–27.

20. Фридман, А.Э. Теория метрологической надежности средств измерений / А.Э. Фридман // Измерительная техника. – 1991. – № 11. – С. 3–10. DOI: 10.1007/BF00979675

21. Application of Self-Calibrating Thermocouples with Miniature Fixed-Point Cells in a Temperature Range from 500°C to 650°C in Steam Generators / F. Bernhard, D. Boguhn, S. Augustin et al. – <https://clck.ru/HfXRw>. DOI: 10.1063/1.1627133

22. Huijising, J.H. Developments in Integrated Smart Sensors / J.H. Huijising, F.R. Riedijk, G. van der Horn // Sensors and Actuators A: Physical. – 1994. – Vol. 43, no. 1-3. – P. 276–288. DOI: 10.1016/0924-4247(93)00657-P

23. Murawski, K. New Vision Sensor to Measure Gas Pressure / K. Murawski // Measurement Science Review. – 2015. – Vol. 15, no. 3. DOI: 10.1515/msr-2015-0020

24. Werthschutzky, R. Sensor Self-Monitoring and Fault-Tolerance / R. Werthschutzky, R. Muller // Technisches Messen. – 2007. – Vol. 74, no. 4. – P. 176–184. DOI: 10.1524/teme.2007.74.4.176

25. Белоусов, М.Д. Оценка собственного состояния термометров сопротивлений / М.Д. Белоусов, А.Л. Шестаков, Н.М. Япарова // Измерения: Состояние, перспективы развития: тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. (г. Челябинск, 25–27 сентября 2012). – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2012. – С. 39–47.

26. Сенсоры температуры с функцией самостоятельной калибровки и градуировки в процессе работы на основе фазовых переходов 2-го рода / М.Д. Белоусов, В.В. Дьячук, Д.А. Мирзаев, А.Л. Шестаков // Труды Третьей российской конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения»: тр. и пленар. докл. участников конф. УКИ'12. – М.: ИПУ РАН, 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 1786–1794.

27. Yaparova, N.M. *Mathematical modelling and method for solving a parametric identification problem for self-test of measuring devices* / N.M. Yaparova // *Inverse problems in science and engineering*. – 2015. – Vol. 24, iss. 1. – p. 77–91. DOI: 10.1080/17415977.2015.1017482

28. Yaparova, N.M. *Mathematical modelling and order-optimal method for solving a parametric identification problem for self-calibration measuring devices* / N.M. Yaparova // *International Conference Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing (AMCTM 2014)*. D.I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), St. Petersburg, Russia, 9 and 10–12 September, 2014.

Белусов Михаил Дмитриевич, инженер кафедры информационно-измерительной техники Высшей школы электроники и компьютерных наук, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; belousovmd@susu.ru.

Поступила в редакцию 11 марта 2019 г.

DOI: 10.14529/ctcr190307

EVALUATION OF MEASUREMENT ACCURACY OF THE RTD TRANSDUCER DURING OPERATION

M.D. Belousov, belousovmd@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The creation of specialized measurement tools for deep integration into modern digital process control systems is became possible only when using microprocessor devices in measuring converters. However, today the improvement of the main characteristics of measuring instruments in modern systems of automatic control systems through the use of microprocessors is largely exhausted with a significant margin of performance of the latter. Therefore, it is now an urgent task for the further improvement of means of measurements is to search for new variants of creation of intellectual means of measurement.

Within the framework of this task, the functional schemes of intelligent temperature measuring transducers are studied in the article and the algorithms for assessing their metrological serviceability in the process of operation in modern ACS are proposed. Proposed, justified and tested on the experiment an algorithm for evaluating the accuracy of the measurement of thermocouple resistance in the process.

Keywords: RTD, status of measurement, the evaluation of the measuring instruments.

References

1. Taimanov R.E., Sapozhnikova K.V. Sapozhnikova K.V. [Metrological Self-Checking of Sensors]. *Sbornik trudov Vtoroy rossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Tekhnicheskie i programnye sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya (teoriya, metody, algoritmy, issledovaniya i razrabotki)"* [Proceedings of the Second Russian Conference with International Participation "Technical and Software Control Systems, Control and Measurement (Theory, Methods, Algorithms, Research and Development)"]. Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences Publ., 2010. CD-ROM. (in Russ.)
2. Johnson R., Kast F., Rosenzweig D. *Sistemy i rukovodstvo (Teoriya sistem i rukovodstvo sistemami)* [Systems and Management (Systems Theory and Systems Management)]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1971. 650 p.
3. Itskovich E.L., Sorokin L.R. *Operativnoe upravlenie nepreryvnym proizvodstvom* [Operational Management of Continuous Production]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 155 p.

4. Kapustin N.M., Kuznetsov P.M., Skhirtladze A.G. et al. *Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov v mashinostroenii: ucheb. dlya vtuzov* [Automation of Production Processes in Mechanical Engineering: Studies for Technical Colleges]. Moscow, Visshaya shkola Publ., 2004. 415 p.
5. Tuchinsky S.V., Andriyanov I.N. [Use of Controllers of the BASIS Series at Step-by-Step Modernization of Production]. *Technical and Software Tools of Automation Systems. Industrial Controllers in Energetic*, 2011, no. 5 (22), pp. 19–24. (in Russ.)
6. GOST R 8.673–2009. *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Datchiki intellektual'nye i sistemy izmeritel'nye intellektual'nye. Osnovnye terminy i opredeleniya* [State Standard R 8.673–2009. The State System of Ensuring the Unity of Measurements. Intelligent Sensors and Intelligent Measuring Systems. Basic Terms and Definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 8 p.
7. GOST R. 8.734–2011. *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Datchiki intellektual'nye i sistemy izmeritel'nye intellektual'nye. Metody metrologicheskogo samokontrolya* [State Standard R 8.734–2011. The State System of Ensuring the Unity of Measurements. Intelligent Sensors and Intelligent Measuring Systems. Methods of Metrological Self-Control]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 20 p.
8. GOST R 8.825–2013. *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Datchiki intellektual'nye i sistemy izmeritel'nye intellektual'nye. Metody uskorenykh ispytaniy* [State Standard R 8.825–2013. The State System of Ensuring the Unity of Measurements. Intelligent Sensors and Intelligent Measuring Systems. Methods of Accelerated Tests]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 10 p.
9. Rannev G.G. *Intellektual'nye sredstva izmereniy: uchebnyk dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy* [Intellectual Measuring Instruments: Textbook for Students of Higher Educational Institutions]. Moscow, Academy Publ., 2011. 272 p.
10. Romanov V.N., Sobolev V.S., Tsvetkov E.I. *Intellektual'nye sredstva izmereniy* [Intellectual Measuring Instruments]. Moscow, Tanyanin den' Publ., 1994.
11. *Kontseptsiya "Ideal'nyy zavod (VigilantPlant)" ot kompanii "Yokogava"* [The Concept of "Ideal Plant (VigilantPlant)" from the Company "Yokogawa"]. Available at: <http://www.yokogawa.com/business/vigilantplant/index.htm>.
12. *Katalog datchikov temperatury kompanii "Metran"* [Catalog of Temperature Sensors of the Company "Metran"]. Available at: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Metran%20Documents/Catalog/Catalogues/Датчики-температуры-каталог.pdf>.
13. Tarbeyev Yu.V., Kuzin A.Yu., Taimanov R.E., Lukashev A.L. [A New Stage in the Development of Metrological Support of Sensors]. *Measurement Technology*, 2007, no. 3, pp. 69–72. (in Russ.)
14. Meijer G.C.M. *Smart Sensor Systems*. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. DOI: 10.1002/9780470866931
15. Henry M.P., Clarke D.W., Archer N. et al. A Self-Validating Digital Coriolis Mass-Flow Meter: An Overview. *Control Engineering Practice*, 2000, vol. 8, iss. 5, pp. 487–506. DOI: 10.1016/S0967-0661(99)00177-X
16. Zhigang Feng, Meng Qiu. Design and Implementation of Self-Validating Pneumatic Actuator Hardware System Based on DSP and MCU. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2014, vol. 7, no. 6, pp. 101–114. DOI: 10.14257/ijhit.2014.7.6.08
17. Itskovich E.L. Modern Intelligent Sensors for General Industrial Purposes, Their Features and Advantages. *Sensors and Systems*, 2002, no. 2, pp. 42–47. (in Russ.)
18. Duta M., Henry M. The Fusion of Redundant SEVA Measurements. *Control Systems Technology, IEEE Transactions*, 2005, vol. 13, iss. 2122. DOI: 10.1109/TCST.2004.840448
19. Larionov V.A. Determination of Calibration Intervals for Intelligent Sensors of Technological Productions. *Devices and Systems. Management, Control, Diagnostics*, 2009, no. 6, pp. 25–27. (in Russ.)
20. Friedman A.E. Theory of Metrological Reliability of Measuring Instruments. *Measurement Technology*, 1991, no. 11, pp. 3–10. (in Russ.) DOI: 10.1007/BF00979675
21. Bernhard F., Boguhn D., Augustin S., Mammen H., Donin A. *Application of Self-Calibrating Thermocouples with Miniature Fixed-Point Cells in a Temperature Range from 500°C to 650°C in Steam Generators*. Available at: <https://clck.ru/HfXRw>. DOI: 10.1063/1.1627133
22. Huijising J.H., Riedijk F.R., van der Horn G. Developments in Integrated Smart Sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1994, vol. 43, no. 1-3, pp. 276–288. DOI: 10.1016/0924-4247(93)00657-P

23. Murawski K. New Vision Sensor to Measure Gas Pressure. *Measurement Science Review*, 2015, vol. 15, no. 3. DOI: 10.1515/msr-2015-0020

24. Werthschutzky R., Muller R. Sensor Self-Monitoring and Fault-Tolerance. *Technisches Messen*, 2007, vol. 74, no. 4, pp. 176–184. DOI: 10.1524/teme.2007.74.4.176

25. Belousov M.D., Shestakov A.L., Yaparova N.M. [Self-made Evaluation of Own State of RTD Sensor]. *Izmereniya: Sostoyaniye, perspektivy razvitiya: tezisy докладов mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Chelyabinsk, 25–27 sentyabrya 2012 g.)* [Measurement: Condition, Prospects of Development: Abstracts of the International Scientific-Practical Conference (Chelyabinsk, September 25–27, 2012)]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2012, pp. 39–47. (in Russ.)

26. Belousov M.D., Dyachuk V.V., Mirzaev D.A., Shestakov A.L. [Temperature Sensors with the Function of Self-Calibration and Calibration during Operation on the Basis of Phase Transitions of the Type 2]. *Trudy Tret'ey rossiyской konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Tekhnicheskie i programnye sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya": trudy i plenarnye doklady uchastnikov konferentsii* [Proceedings of the Third Russian Conference with International Participation "Technical and Software of Control, Control and Measurement Systems": Proc. and Plenary Reports of the Participants of the UCI Conference'12]. Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 2012, CD-ROM, pp. 1786–1794. (in Russ.)

27. Yaparova, N.M. Mathematical Modeling and Method for Solving a Parametric Identification Problem for Self-Test of Measuring Devices. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2015, vol. 24, iss. 1, pp. 77–91. DOI: 10.1080/17415977.2015.1017482

28. Yaparova N.M. Mathematical Modeling and Order-Optimal Method for Solving a Parametric Identification Problem for Self-Calibration Measuring Devices. *International Conference Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing (AMCTM 2014). D.I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), St. Petersburg, Russia, 9 and 10–12 September, 2014.*

Received 11 March 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Белусов, М.Д. Оценка точности измерения термомпреобразователей сопротивления в процессе работы / М.Д. Белусов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 68–78. DOI: 10.14529/ctcr190307

FOR CITATION

Belousov M.D. Evaluation of Measurement Accuracy of the RTD Transducer during Operation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 68–78. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190307

Управление в социально-экономических системах

УДК 519.6

DOI: 10.14529/ctcr190308

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕХАНИЗМ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ ОРГАНИЗАЦИИ

В.Н. Бурков¹, А.В. Щепкин¹, К.Е. Амелина², З.М. Даулбаева³, С.А. Рязанцев⁴

¹ Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия,

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия,

³ Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан,

⁴ ПАО «НК «Роснефть», г. Москва, Россия

Рассматривается комплексная технология (механизм) разработки системы управления развитием организаций (СУРО). Эта технология включает в себя пять этапов. Цель каждого этапа определяется путем декомпозиции основной цели развития. Дается описание задач, решаемых на каждом этапе. Первый этап связан с формированием интегральной (комплексной) оценки состояния организации (текущего и планируемого). Интегральная оценка определяется на основе дихотомического дерева свертки критериев оценки по различным направлениям деятельности организации. При этом для каждого критерия задается качественная шкала оценивания. На втором этапе формируется потенциал развития организации, то есть множество мероприятий, проведение которых улучшает оценки по одному или нескольким критериям. Каждое мероприятие (проект) оценивается по величине затрат на его реализацию и величине эффекта. Третий этап играет центральную роль. На этом этапе определяется программа развития организации, то есть программа повышения комплексной оценки до требуемой величины с минимальными затратами. При этом учитывается наличие многоцелевых и взаимозависимых проектов, а также риски. На четвертом этапе разрабатывается календарный план при заданном графике финансирования по критерию минимизации времени или упущенной выгоды. Пятый этап посвящен методам корректировки программы и разработке систем стимулирования. Для каждого этапа дается описание механизмов управления и оптимизационных моделей.

Ключевые слова: комплексный механизм развития, потенциал развития, комплексная оценка состояния, программы развития, календарный план.

Введение

Система управления развитием организации (СУРО) направлена на повышение эффективности разработки и реализации программ развития предприятий регионов и отраслей. В работе под организацией понимается объединение совместно работающих людей, деятельность которых сознательно координируется для достижения определенных общих целей [1]. Соответственно, управление организацией – это совокупность управленческих действий, которые логично связываются друг с другом, чтобы обеспечить достижение поставленных целей путем преобразования ресурсов на «входе» в продукцию или услуги на «выходе» системы [2]. Эффективность функционирования организации во многом зависит от условий, которые на нее накладывает внешняя среда, и предприятие вынуждено подстраиваться под эти условия. Такая подстройка предприятия под изменяющиеся внешние условия, особенно в неустойчивой правовой среде, ставит его в положение постоянно отстающего. Для того чтобы выйти из этого порочного круга, предприятие вынуждено прогнозировать изменение внешних условий, что позволяет управлять процессом развития предприятия. Управление развитием организации – это определение основных долго-

срочных целей и задач предприятия и утверждение курса действий, распределение ресурсов, необходимых для достижения этих целей [3]. Другое определение этого понятия содержится в [4]: управление развитием организации – это процесс, который призван обеспечивать наращивание потенциала организации и повышение уровня его использования. Оценка эффективности управления развитием организации – это оценка того, в какой мере организация использует существующие возможности для повышения качества результатов деятельности.

В статье рассматривается комплексный механизм разработки системы управления развитием организациями. Этот механизм, как было сказано выше, включает в себя пять этапов.

Этап 1. Формирование комплексной оценки состояния организации.

Этап 2. Формирование потенциала развития.

Этап 3. Определение целей и формирование программы развития.

Этап 4. Формирование календарного плана.

Этап 5. Корректировка плана и стимулирование реализации программы.

Раскрывается суть каждого этапа и дается описание механизмов управления, применяемых на каждом этапе. Производится декомпозиция цели на подцели каждого этапа.

1. Цели развития организации

Для оценки успешности разработки и реализации программ необходимо сформулировать генеральную (основную) цель развития организации. В работах по управлению проектами отмечается, что цели должны соответствовать требованиям SMART (Specific – Специализированные, Mesurable – Измеримые, Actively Influencible – Актуальные, Realistic – Реалистичные, Time Limited – Ограниченные по времени) [5]. Принципиальным моментом для формирования критериев достижения цели является измеримость. Однако, как правило, формулировка основной цели развития организации цели носит достаточно общий характер. Для конкретизации целей осуществляется декомпозиция целей путем построения «дерева целей» – структурированной, построенной по иерархическому принципу совокупности целей программы.

Для оценки достижения поставленных целей формируются критерии достижения целей. Прежде чем приступить к формированию дерева целей, необходимо осуществить декомпозицию основных целей организации. Кроме этого, необходимо разработать критерии достижения целей. Значения этих критериев дают возможность определить достижение поставленных целей. Это осуществляется путем сравнения количественных характеристик (установленных критериев достижения целей) и достигнутых соответствующих показателей. Например, если основная цель программы развития организации является обеспечение устойчивого положения на рынке, то очевидно, что для детализации этой цели должны быть сформулированы более конкретные подцели. Эту детализацию можно представить в виде, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Декомпозиция генеральной цели программы

Из рис. 1 видно, что не всегда первый уровень иерархии позволяет сформировать критерии достижения цели. Поэтому для формирования соответствующих критериев необходимо цели первого уровня иерархии декомпозировать на еще один уровень.

После этого все множество целей программ развития предприятий можно представить в виде, как показано на рис. 2.



Рис. 2. Декомпозиция целей программы

Основываясь на формулировке целей второго уровня иерархии можно сформировать критерии достижения этих целей.

Для достижения поставленных целей определяется и реализуется набор соответствующих мероприятий. Успешность и эффективность выполнения соответствующих мероприятий во многом определяется условиями, в которых они реализуются. А условия для выполнения мероприятий формируются применением механизмов управления.

Для достижения целей, определенных в результате декомпозиции основной цели программы развития, представленных на рис. 2, необходимо применить комплекс различных механизмов управления, представленных на рис. 3 [6, 7].

Очевидно, что использование одного механизма для достижения конкретной цели решает только частную задачу реализации программ развития, в то время как применение целого комплекса механизмов порождает проблему согласования механизмов. А без разрешения этой проблемы не исключена ситуация, как в известной басне И.А. Крылова: «...Лебедь рвется в облака, Рак пятится назад, а Щука тянет в воду...».



Рис. 3. Комплекс механизмов управления

Заметим, что технология разработки СУРО была создана в ИПУ РАН при участии ведущих специалистов по стратегическому менеджменту [8]. Однако в существующем виде она, на наш взгляд, недостаточно использует оптимизационные модели. В связи с этим в работе дается описание комплекса оптимизационных моделей, в значительной степени повышающих эффективность технологии разработки СУРО. Ряд из этих моделей в отдельности применялись, однако авторы попытались создать комплексную технологию разработки СУРО на основе механизмов управления и оптимизационных моделей.

2. Механизм комплексного оценивания (этап 1)

Механизм комплексного оценивания позволяет строить агрегированную или комплексную оценку (КО) сложного объекта путем свертки большого числа показателей, характеризующих объект, с учетом степени их влияния. Действие механизма основано на объединении показателей в группы (характеристики объекта по выделенным направлениям оценивания), переводе разнородных показателей в единую шкалу балльных оценок, формировании балльной оценки направления и последующей попарной свертке оценок направлений.

Так как оценка достижения цели в общем случае достаточно сложная процедура, поэтому считается, что организацию характеризует набор частных критериев $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ достижения цели, и необходимо построить комплексный критерий функционирования организации $KO = f(A_1, A_2, \dots, A_n)$. При этом структура комплексной оценки представлена в дихотомическом виде [9].

Основная идея при разработке механизма комплексного оценивания заключается в том, что каждая вершина дерева целей, в том числе промежуточные и итоговая вершина, дезагрегируется ровно на две подвершины, то есть используется так называемый метод дихотомии [10–11]. Это позволяет проводить агрегирование каждой пары вершин в последующую вершину (верхнего уровня) с помощью логических матриц свертки.

Реализация методологии оценивания состоит в последовательном выполнении соответствующих этапов. Принципиальным моментом является тот факт, что для построения КО прежде всего формируется набор направлений или характеристик, которые дают общее представление об объекте и всех его особенностях с различных точек зрения. Затем для этих направлений строятся локальные оценки, которые затем сворачиваются в КО.

Наиболее популярна четырехбалльная шкала: плохо – 1, удовлетворительно – 2, хорошо – 3, отлично – 4. Определяются граничные уровни эффекта: A_1, A_2, A_3, A_4 . Если эффект \mathcal{E} по направлению меньше A_1 , то это катастрофическое состояние по данному направлению. Если $A_1 \leq \mathcal{E} < A_2$, то оценка плохо. Если $A_2 \leq \mathcal{E} < A_3$, то оценка удовлетворительно. Если $A_3 < \mathcal{E} < A_4$, то оценка хорошо. Наконец, если $\mathcal{E} \geq A_4$, то оценка отлично.

Цель первого этапа «формирование комплексной оценки состояния организации» заключается в максимально адекватном отражении мнения руководителя организации о том, в каком состоянии они находятся. Для достижения этой цели необходимо решить две задачи.

Задача 1. Выбрать структуру дихотомического дерева КО.

Задача 2. Выбрать матрицы свертки в каждой вершине дихотомического дерева.

В настоящее время эти задачи решаются на основе эвристики с учетом предпочтений лиц, принимающих решения.

Из рис. 1 следует, что для формирования КО состояния организации могут быть выбраны шесть направлений деятельности: финансы, производство, маркетинг, кадры, снабжение и сбыт. Структура дихотомического дерева для этих шести направлений деятельности может быть представлена в виде, как показано на рис. 4.

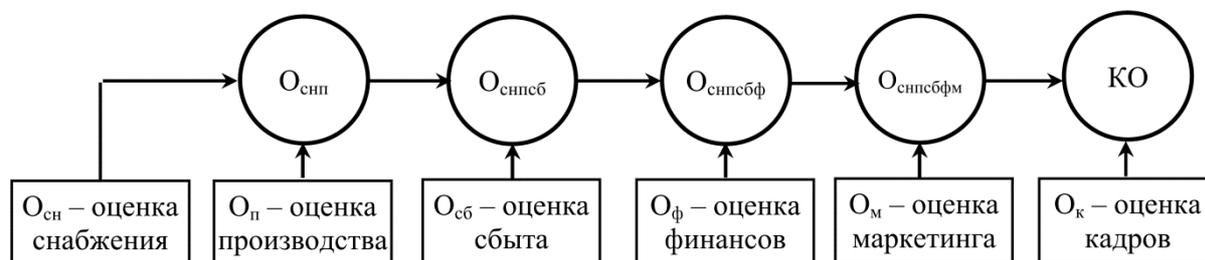


Рис. 4. Структура дихотомического дерева

Пусть оценки направлений имеют следующие значения $O_{сн} = 3, O_{п} = 3, O_{сб} = 2, O_{ф} = 2, O_{м} = 2, O_{к} = 3$. Для построения комплексной оценки выбраны следующие матрицы свертки (рис. 5).

$$M_1 = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 3 & 4 \\ 2 & 2 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 2 & 2 \end{bmatrix} \quad M_2 = \begin{bmatrix} 3 & 3 & 4 & 4 \\ 2 & 3 & 3 & 4 \\ 2 & 2 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 2 & 3 \end{bmatrix} \quad M_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Рис. 5. Матрицы свертки для четырехбалльной шкалы

Для получения обобщенной оценки направлений «снабжение» и «производство» ($O_{снп}$) выбрана матрица M_3 , для свертки $O_{снп}$ и оценки направления «сбыт» выбрана матрица M_1 , для свертки $O_{снпсб}$ и оценки направления «финансы» выбрана матрица M_2 , для свертки $O_{снпсб}$ и оценки направления «финансы» выбрана матрица M_2 , для свертки $O_{снпсбф}$ и оценки направления «маркетинг» выбрана матрица M_3 , и, наконец, для расчета КО выбрана матрица M_3 .

Процедура формирования КО представлена на рис. 6.

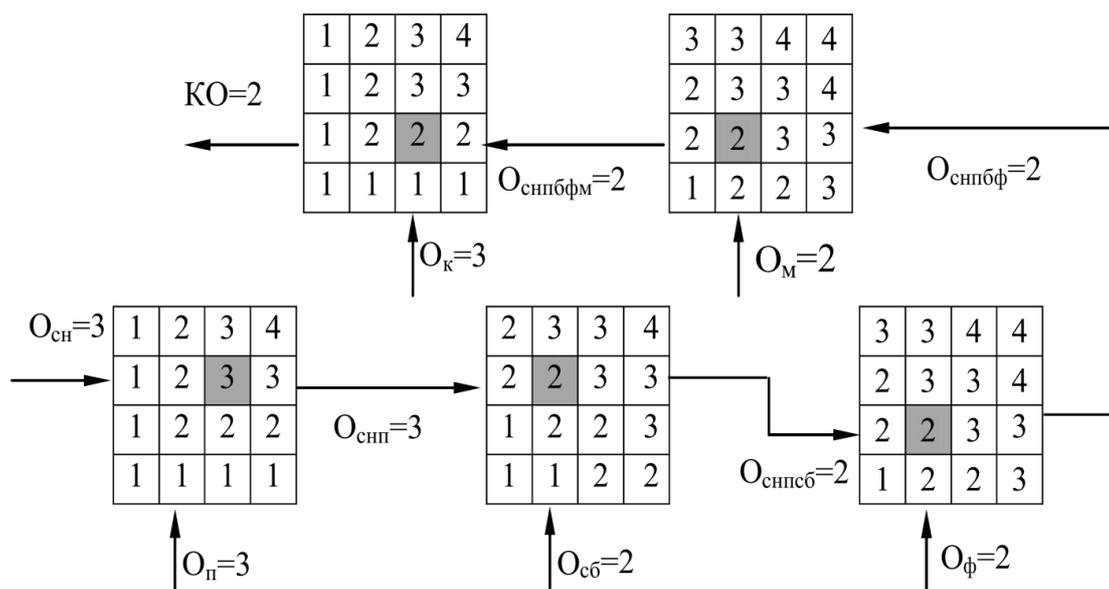


Рис. 6. Процедура формирования КО

Таким образом, КО организации равна 2.

3. Формирование потенциала развития (этап 2)

На этом этапе формируется потенциал развития организации – под ним понимается множество проектов (мероприятий), реализация которых улучшает один или несколько критериев. Это происходит путем сбора предложений от подразделений и отдельных лиц, «мозгового штурма» и т. д.

Каждый проект описывается эффектом (вклад в улучшение одного или нескольких показателей), затратами на реализацию и уровнем риска.

Цель данного этапа – получить достоверные оценки проектов. Для получения достоверных оценок эффекта и затрат применяются экспертные механизмы, механизмы встречного планирования, противозатратные механизмы [7, 12, 13].

Получение оценок риска происходит на основе неманипулируемых экспертных механизмов [7].

4. Формирование программы развития (этап 3)

4.1. Метод «затраты – эффект»

Программа развития формируется на основе потенциала развития.

Цель этого этапа – обеспечить развитие организации, то есть требуемое повышение КО с минимальными затратами при ограничении на допустимый уровень риска.

Сначала рассмотрим простой случай, когда для каждого направления существует свое множество мероприятий, и эти множества не пересекаются. Для этого случая классическим и самым часто применяемым на практике является механизм «затраты – эффект» [7].

Все проекты данного направления упорядочиваются по эффективности и отбираются согласно этому упорядочению, пока эффект не будет равен или больше соответствующего граничного значения.

Упорядочивание проектов для определения потенциала развития проиллюстрируем на примере пяти проектов. Заполняется табл. 1, в которой рассчитывается эффективность проектов.

Таблица 1

Определение эффективности проектов

№ проекта	Затраты на реализацию	Оценка эффекта	Эффективность
Проект № 1	b_1	w_1	w_1/b_1
Проект № 2	b_2	w_2	w_2/b_2
Проект № 3	b_3	w_3	w_3/b_3
Проект № 4	b_4	w_4	w_4/b_4
Проект № 5	b_5	w_5	w_5/b_5

Сравнить эффективности проектов можно, построив график, на котором по оси абсцисс откладываются значения затрат, а по оси ординат откладываются значения эффектов. Для i -го проекта получаем отрезок, выходящий из начала координат и заканчивающийся в точке с координатами (b_i, w_i) , $i = 1, \dots, n$. Таким образом, получим пучок, состоящий из n отрезков (рис. 7).

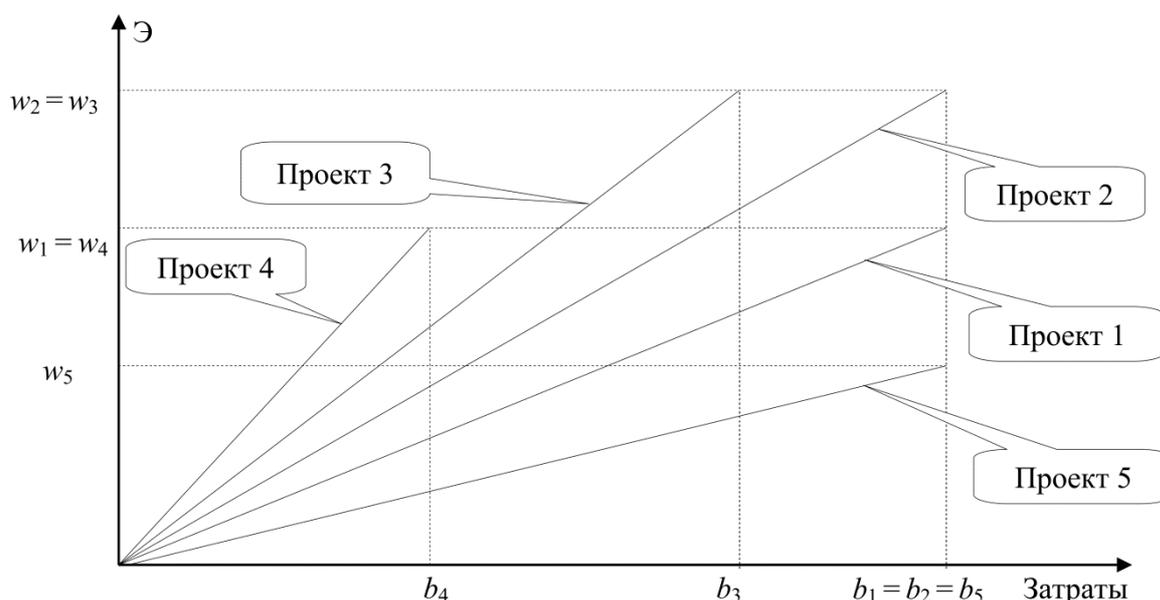


Рис. 7. Эффективность проектов

Полученные значения эффективности позволяют построить график «затраты – эффект», из которого видно, какой максимальный эффект может быть получен от реализации этих проектов и какие средства необходимо вложить в реализацию этих проектов.

Для удобства построения графика «затраты – эффект» предварительно необходимо табл. 1 представить в виде табл. 2.

Таблица 2

Упорядочивание проектов по эффективности

№ проекта	Затраты на реализацию	Эффективность	Затраты нарастающим итогом	Эффект нарастающим итогом
Проект № 4	b_4	w_4/b_4	b_4	w_4
Проект № 3	b_3	w_3/b_3	$b_4 + b_3$	$w_4 + w_3$
Проект № 2	b_2	w_2/b_2	$b_4 + b_3 + b_2$	$w_4 + w_3 + w_2$
Проект № 1	b_1	w_1/b_1	$b_4 + b_3 + b_2 + b_1$	$w_4 + w_3 + w_2 + w_1$
Проект № 5	b_5	w_5/b_5	$b_4 + b_3 + b_2 + b_1 + b_5$	$w_4 + w_3 + w_2 + w_1 + w_5$

В табл. 2 проекты упорядочены по эффективности. А именно: на первом месте стоит самый эффективный проект, затем – следующий по эффективности и т. д.

График «затраты – эффект» строится на основе данных, находящихся в двух последних столбцах. По оси абсцисс откладываются суммарные затраты, а по оси ординат – суммарное значение эффекта. График «затраты – эффект» представлен на рис. 8.

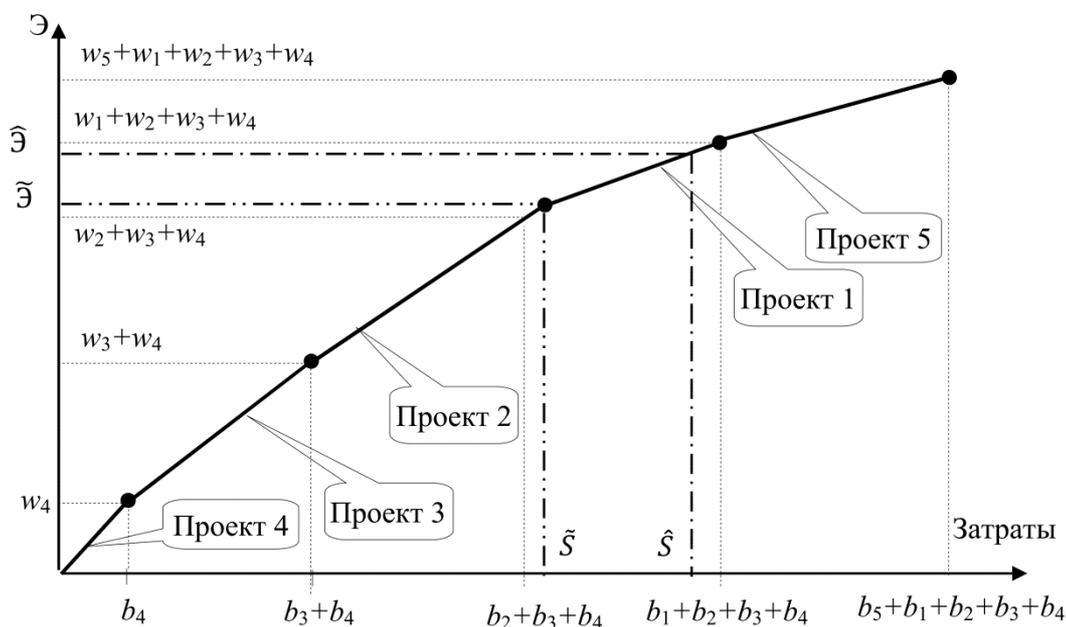


Рис. 8. График «затраты – эффект»

График «затраты – эффект» дает возможность определить размер средств \hat{S} , который необходим для достижения требуемого эффекта \hat{E} , и, наоборот, определить размер эффект \tilde{E} , который может быть достигнут, если в распоряжении имеются средства в размере \hat{S} .

На основе графиков «затраты – эффект» для каждого направления i определяются минимальные затраты s_{ij} , необходимые для достижения требуемых оценок O_{ij} .

Матрица минимальных затрат $\{s_{ij}\}$ применяется для решения задачи формирования оптимального варианта программы (вариантом программы называется последовательность оценок направлений), то есть варианта, обеспечивающего требуемую величину комплексной оценки с минимальными затратами. Для решения этой задачи применяется метод дихотомического программирования. [14].

4.2. Учет многоцелевых проектов

Многоцелевыми называются проекты, которые дают эффект в несколько направлений. Для решения задачи в этом случае применяются два подхода.

Первый состоит в переборе всех вариантов вхождения в программу многоцелевых проектов. Если число многоцелевых проектов равно q , то число вариантов равно 2^q . При небольшом числе многоцелевых проектов метод достаточно эффективен. Для каждого варианта решается задача с одноцелевыми проектами, как описано выше. Из всех вариантов выбирается лучший.

Второй подход основан на методе сетевого программирования. Затраты каждого многоцелевого проекта делятся произвольным образом на несколько частей по числу направлений, в которые дает эффект соответствующий проект. Получаем задачу с одноцелевыми проектами. Из теории сетевого программирования известно, что решение этой задачи дает оценку снизу затрат для исходной задачи [14]. Эта оценка используется в методе ветвей и границ.

4.3. Взаимозависимые проекты

Взаимозависимыми называются проекты, вхождение которых в программу дает дополнительный (синергетический) эффект. Здесь применяются три подхода.

Первый, как и в случае многоцелевых проектов, заключается в переборе всех вариантов вхождения в программу соответствующих пар проектов.

Во втором подходе дополнительный эффект для каждой пары взаимозависимых проектов делится произвольным образом на две части. Одна часть добавляется к эффекту одного проекта,

а другая – к эффекту другого. Далее задача решается, как описано в [14]. Ее решение дает нижнюю оценку затрат. Эта оценка применяется в методе ветвей и границ. Наконец, третий подход использует понятие «ширины» графа взаимозависимостей. Графом взаимозависимостей называется n – вершинный (по числу проектов) неориентированный граф, ребра которого связывают взаимозависимые проекты.

Определение. Шириной графа h называется максимальная разность номеров смежных вершин.

В работе [15] предложен алгоритм решения задачи формирования программы с взаимозависимыми проектами, сложность которого имеет порядок 2^h .

При малых h алгоритм эффективен.

4.4. Учет технологических зависимостей

В ряде случаев проекты программы технологически связаны. Такие зависимости изображаются в виде сетевого графика. Примером является создание нового изделия, включающее проведение НИР, ОКР и собственно создание изделия [16] (рис. 9).

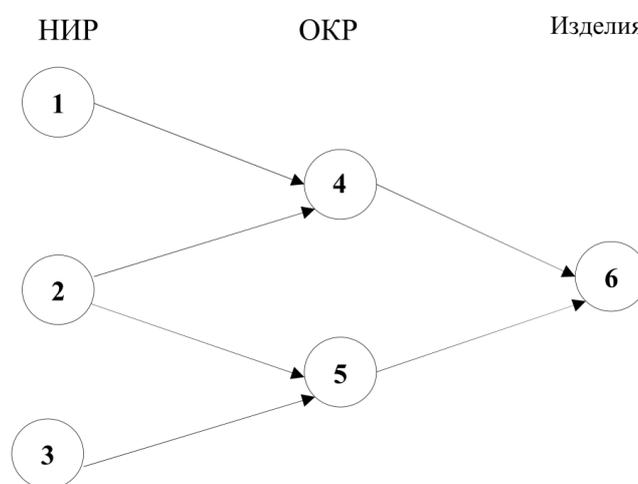


Рис. 9. Сетевой график

Если сетевой граф является лесом (граф без циклов), то предлагается алгоритм формирования программы на основе метода дихотомического программирования. Для сетевых графиков общего вида в работе [16] предложены эвристические алгоритмы.

4.5. Управление рисками

В задачах управления проектными и программными рисками, как правило, применяются качественные оценки рисков. Риск характеризуется показателями вероятности v , ущерба u и степенью влияния $w = u \times v$. Будем рассматривать двухоценочную шкалу оценки рисков (низкий риск и высокий риск).

Определим экспертно две граничные точки v и u . Если проект имеет низкий риск по вероятности, то считаем, что вероятность меньше или равна v . Если проект имеет высокий риск, то считаем, что вероятность больше v .

Аналогично по ущербу. Таким образом, существуют четыре типа проектов: (НН), (НВ), (ВН), (ВВ) (Н – низкий риск, В – высокий риск; первая буква – риск по вероятности, вторая по ущербу).

На основе граничных уровней определяются базовые уровни рисков:

$$v_1 = \frac{v}{2}, v_2 = \frac{1+v}{2}, u_1 = \frac{u}{2}, u_2 = \frac{1+u}{2} \dots$$

В настоящее время разработана методология управления стоимостными рисками [17].

Обозначим:

Q_1 – множество проектов типа (НН);

Q_2 – множество проектов типа (НВ);

Q_3 – множество проектов типа (ВН);

Q_4 – множество проектов типа (ВВ).

$a_j, j = 1, 2, 3, 4$ относительная суммарная стоимость проектов j -го типа. Ущерб от рисков программы равен

$$U = (a_1 + a_3)u_1 + (a_2 + a_4)u_2.$$

Степень влияния рисков программы равна

$$P = \sum_j a_j v_j,$$

где $p_1 = u_1 v_1, p_2 = u_2 v_1, p_3 = u_1 v_2, p_4 = u_2 v_2$.

Вероятность рисков программы равна $V = \frac{P}{U}$.

Соответственно, программа имеет низкий риск по вероятности, если $V \leq v$, низкий риск по ущербу, если $U \leq u$, и низкий уровень степени влияния, если $P \leq p$.

Умея оценивать риски программы, можно решать задачи управления рисками на основе стратегий снижения рисков и уклонения от рисков.

Стратегия снижения рисков. Заметим, что для проектов типа (НВ) и (ВН) существует один вариант степени влияния, в то время как для проектов типа (ВВ) таких вариантов 3 (первый – снизить до низкого вероятностный риск, второй – снизить до низкого риск по ущербу и третий – снизить до низкого и риск по вероятности, и риск по ущербу).

Обозначим $x_{ij} = 1$, если для проекта i применяется j -й вариант снижения рисков, причем

$$\sum_j x_{ij} \leq 1. \quad (1)$$

Обозначим s_{ij} – затраты на снижение рисков мероприятия i по варианту j .

Задача. Определить $\{x_{ij}\}$, минимизирующие

$$S(x) = \sum_{i,j} x_{ij} s_{ij}$$

при ограничении (1) и

$$P(x) = \sum_{i,j} x_{ij} p_{ij} \leq p.$$

Мы получили некоторую модификацию задачи о ранце, эффективно решаемую методом динамического программирования [14].

Можно также сформулировать задачу управления рисками на основе стратегии уклонения (ограничивается множество высокорисковых проектов, включаемых в программу), а также на основе смешанной стратегии (и уклонения, и снижения).

5. Формирование календарного плана (этап 4)

Цель данного этапа – сформировать календарный план при ограниченных ресурсах по одному из двух критериев:

- 1) минимизация продолжительности программы T ;
- 2) минимизация упущенной выгоды

$$\Phi = \sum_i k_i t_i,$$

где k_i – коэффициент упущенной выгоды, t_i – момент завершения проекта i .

Задачи календарного планирования являются, как правило, сложными (NP – трудными) задачами оптимизации. Для их решения в основном применяются эвристические алгоритмы. Приведем пример задачи формирования календарного плана [16]. Задан сетевой график программы, данные о проектах (эффекты и затраты) и интегральный график финансирования программы (график поступления средств).

Задача. Определить моменты начала проектов так, чтобы минимизировать упущенную выгоду с учетом ограничений на финансирование.

В работе [16] предложены эвристические алгоритмы для ее решения.

6. Корректировка плана и стимулирование реализации программы (этап 5)

Цель этого этапа состоит в повышении надежности реализации программы на основе механизмов корректировки и стимулирования.

Корректировка плана в общем случае включает корректировку состава программы (включение новых проектов, исключение имеющихся) и корректировку собственно календарного плана, то есть повторение этапов 3 и 4. Здесь следует иметь в виду одну особенность. При исключении проекта из программы (в силу уменьшения эффекта, увеличения рисков и т. д.) возникают дополнительные затраты на закрытие проекта и эти затраты необходимо учитывать.

Механизмы стимулирования применяются для повышения надежности реализации программы. Они подробно описаны в [18].

7. Пример

Приведем пример применения описанной технологии в упрощенном виде. А именно, рассмотрим три показателя (снабжение, производство и сбыт), характеризующие производственный цикл предприятия). Заметим, что этап 1 (механизм комплексного оценивания) был уже выполнен ранее. Он включает построение структуры дихотомического дерева (поддерево рис. 4; содержащее две вершины $O_{снп}$ и $O_{снпсб}$, три висячие вершины ($O_{сн}$, $O_{п}$ и $O_{сб}$) и две матрицы M_3 и M_1 .

Рассмотрим этап 2. Пусть для каждого показателя имеются по три проекта (мероприятия), данные о которых приведены ниже.

Снабжение			
Проект	1	2	3
Эффект	10	12	8
Затраты	3	6	5

Производство			
Проект	1	2	3
Эффект	9	12	9
Затраты	4	7	6

Сбыт			
Проект	1	2	3
Эффект	7	10	8
Затраты	3	7	8

Переходим к этапу 3.

Примем, что многоцелевые и взаимозависимые проекты отсутствуют и все проекты имеют низкий риск.

Будем оценивать начальные значения показателей по 100-балльной шкале и определим граничные уровни перехода к качественным шкалам.

Показатель «Снабжение»

Примем граничные уровни $A_1 = 15$, $A_2 = 35$, $A_3 = 60$.

Это означает, что если начальное состояние $Y_{сн} < 15$, то оценка $O_{сн} = 1$.

Если $15 \leq Y_{сн} < 35$, то оценка $O_{сн} = 2$.

Если $35 \leq Y_{сн} < 60$, то оценка $O_{сн} = 3$.

Если $Y_{сн} \geq 60$, то оценка $O_{сн} = 4$.

Примем начальное состояние $Y_{сн} = 40$, что соответствует оценке $O_{сн} = 3$.

Показатель «Производство»

Для упрощения вычислений примем те же граничные уровни и начальное состояние $Y_{п} = 40$, что также соответствует оценке $O_{сн} = 3$.

Показатель «Сбыт»

Граничные уровни оставим прежние.

Примем начальное состояние $Y_{сб} = 30$, что соответствует оценке $O_{сб} = 2$.

Применяя метод «затраты – эффект», определяем матрицу минимальных затрат s_{ij} , $i = \overline{1,3}$, $j = \overline{1,4}$.

Показатель «Снабжение»

Поскольку $O_{сн} = 3$, то $s_{13} = 2$, что соответствует затратам, требуемым для сохранения оценки 3.

Для перехода к оценке 4, применяя метод «затраты – эффект», получаем $s_{14} = 9$ (это соответствует реализации проектов 1 и 2).

Действуя аналогично, имеем для показателя «Производство»: $s_{23} = 2$, $s_{24} = 11$, что соответствует реализации проектов 1 и 2.

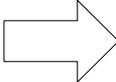
Наконец, для показателя «Сбыт» имеем: $s_{32} = 1$, $s_{33} = 10$, $s_{34} = \infty$, то есть оценка $O_{сб} = 4$ недостижима на основе имеющихся проектов.

Управление в социально-экономических системах

Имея матрицу минимальных затрат, определяем оптимальную программу повышения КО до величины 3.

1 шаг. Рассматриваем матрицу M_3

4; 9	1	2	3; 11	4; 20
3; 2	1	2	3; 4	3; 13
2	1	2	2	2
1	1	1	1	1
1 2	1	2	3; 2	4; 11



4	20
3	4

Поясним эту таблицу. Поскольку начальные состояния $O_{сн} = O_n = 3$, то в таблице заполнены клетки со строками и столбцами с номерами 3 и 4. Первое число в клетках соответствует обобщенной оценке, а второе – затратам на получение этой оценки. Таблица справа определяет минимальные затраты, требуемые для получения обобщенной оценки $O_{сн} = 3$ или 4.

2 шаг. Рассматриваем матрицу M_1 , причем только строки 3 и 4 и столбцы 2 и 3.

4; 20	3; 21	3; 30
3; 4	2; 5	3; 14
(1, 2) 3	2; 1	3; 10

Оптимальное решение определяется клеткой (3; 14). Ему соответствует включение в программу проекта 2 по показателю «Сбыт» и сохранение оценок 3 по показателям «Снабжение» и «Производство».

Этап 4. Формирование календарного плана в данном случае выполняется элементарно, поскольку в программу входит всего один проект (не считая мероприятий по сохранению оценок 3 по показателям «Снабжение» и «Производство»).

Заключение

В статье рассмотрены комплексные технологии разработки системы управления развитием организаций (СУРО). Ее особенностью является широкое использование цифровых технологий в виде умных механизмов управления [7] и оптимизационных моделей. Технология опробована при разработке программ обеспечения экологической безопасности [19], программ обеспечения безопасности дорожного движения [20], программ управления научно-технической деятельностью и результатами интеллектуальной деятельности [16] и других. Представляется перспективным направлением разработка программного обеспечения, позволяющего создавать системы управления развитием организацией в автоматизированном режиме. Безусловно, важным является также дальнейшее расширение состава моделей и механизмов и совершенствование методов решения оптимизационных задач.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-19-10609, раздел I и гранта РФФИ № 18-07-01285А, раздел II.

Литература

1. Подлесных, В.И. Теория организации: учеб. для вузов / В.И. Подлесных. – СПб.: Издат. дом «Бизнес-пресса», 2003. – 336 с.
2. Румянцева, З.П. Общее управление организацией. Теория и практика. / З.П. Румянцева. – М.: ИНФРА-М, 2007. – 304 с.
3. Ансофф, И. Стратегическое управление / И. Ансофф. – М.: Экономика, 2006. – 529 с.
4. Дроздов, И.Н. Управление развитием организации / И.Н. Дроздов. – Владивосток: ПИППККГС, 2001 – 110 с.
5. Doran, G.T. There's a S.M.A.R.T. way to write management's goals and objectives / G.T. Doran // Management Review. – 1981. – Vol. 70, iss. 11 (AMA FORUM). – P. 35–36.

6. Новиков, Д.А. Теория управления организационными системами / Д.А. Новиков. – 3-е изд. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2012. – 604 с.
7. Механизмы управления: учеб. пособие / под ред. Д.А. Новикова. – М.: Ленанд, 2011. – 192 с. – (Умное управление).
8. 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. – 228 с.
9. Дихотомическое представление при комплексной оценке предприятий / И.В. Буркова, О.И. Дранко, С.В. Крюков, А.Ю. Струков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6, № 11. – С. 133–136.
10. Бурков, В.Н. Метод дихотомического программирования / В.Н. Бурков, И.В. Буркова, М.В. Попок // Управление большими системами. – М.: ИПУ РАН, 2004. – Вып. 9. – С. 57–75.
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. Бурков, В.Н. Неманипулируемые механизмы экспертных оценок при разработке региональных программ / В.Н. Бурков, О.В. Будков, Ю.А. Карпов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6, № 11. – С. 144–147.
13. Щепкин, А.В. Противозатратные механизмы финансирования / А.В. Щепкин // Проблемы управления. – 2018. – № 3. – С. 17–25.
14. Буркова, И.В. Метод сетевого программирования в задачах нелинейной оптимизации / И.В. Буркова // Автоматика и телемеханика. – 2009. – № 10. – С. 15–21.
15. Эффективные алгоритмы решения задачи целочисленного квадратичного программирования / В.Н. Бурков, И.В. Буркова, В.О. Китиков, С.Н. Фокин // Труды 8-й Международной научной конференции «Танаевские чтения» (Минск, 2018). – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2018. – С. 38–42.
16. 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.
17. Управление программными рисками на основе качественных оценок их характеристик / Р.А. Агзямов, В.Н. Бурков, В.Г. Борковская, Т.В. Насонова // Экономика и менеджмент систем управления. – 2017. – Т. 26, № 4. – С. 42–49.
18. Новиков, Д.А. Стимулирование в организационных системах / Д.А. Новиков. – М.: Синтез, 2003. – 312 с.
19. 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.
20. Бурков, В.Н. Механизмы повышения безопасности дорожного движения / В.Н. Бурков, В.Д. Кондратьев, А.В. Щепкин. – М.: УРСС, 2011. – 208 с.

Бурков Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва; vlab17@bk.ru.

Щепкин Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва; sch@ipu.ru.

Амелина Ксения Евгеньевна, канд. юрид. наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва; amelks@mail.ru.

Даулбаева З.И., докторант, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан.

Рязанцев Сергей Анатольевич, гл. специалист, ПАО «НК «Роснефть», г. Москва; Sergey.A.Ryazantsev@gmail.com.

Поступила в редакцию 31 мая 2019 г.

COMPLEX MECHANISM OF DEVELOPMENT MANAGEMENT OF THE ORGANIZATION

V.N. Burkov¹, vlab17@bk.ru,
A.V. Shchepkin¹, sch@ipu.ru,
K.E. Amelina², amelks@mail.ru,
Z.M. Daulbaeva³,
S.A. Ryazantsev⁴, Sergey.A.Ryazantsev@gmail.com

¹ V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation,

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation,

³ Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan,

⁴ Rosneft, Moscow, Russian Federation

The complex technology (mechanism) of the development management system of organizations (DMSO) is considered. This technology includes five stages. The goal of each stage is determined by decomposing the main goal of development. The description of the tasks solved at each stage is given. The first stage is associated with the formation of an integrated (integrated) assessment of the state of the organization (current and planned). Integral assessment is determined based on the dichotomous tree of convolution of evaluation criteria in various areas of the organization. In addition, for each criterion, a qualitative rating scale is set. At the second stage, the development potential of the organization is formed, that is, a multitude of events, the performance of which improves the assessment according to one or several criteria. Each event (project) is estimated by the magnitude of the cost of its implementation and the magnitude of the effect. The third stage plays a central role. At this stage, the development programs of the organization are determined, that is, the program of increasing the integrated assessment to the required value with minimal costs. This takes into account the presence of multi-purpose and interdependent projects, as well as risks. At the fourth stage, a calendar plan is developed with a given financing schedule based on the criterion of minimizing time or lost profit. The fifth stage is devoted to methods of adjusting the program and developing incentive systems. For each stage, a description of the control mechanisms and optimization models is given.

Keywords: integrated development mechanism, development potential, comprehensive assessment of the state, development programs, calendar plan.

References

1. Podlesnykh V.I. *Teoriya organizatsii: uchebnik dlya vuzov* [Theory of the Organization: Textbook for Higher Education Institutions]. St. Petersburg, Biznes-pressa Publ., 2003. 336 p.
2. Rumyantseva Z.P. *Obshcheye upravleniye organizatsiyey. Teoriya i praktika*. [General Management of the Organization. Theory and Practice]. Moscow, INFRA-M Publ., 2007. 304 p.
3. Ansoff I. *Strategicheskoye upravleniye* [Strategic Management]. Moscow, Ekonomika Publ., 2006. 529 p.
4. Drozdov I.N. *Upravleniye razvitiyem organizatsii*. [Management of Organization Development]. Vladivostok, 2001. 110 p.
5. Doran, G.T. There's a S.M.A.R.T. Way to Write Management's Goals and Objectives. *Management Review*, 1981, vol. 70, iss. 11 (AMA FORUM), pp. 35–36.
6. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of Management of Organizational Systems]. Moscow, Phys.-mat. lit. Publ., 2012. 604 p.
7. Novikov D.A. (Ed.) *Mehanizmy upravleniya: uchebnoe posobie* [Mechanisms of Management: Manual]. Moscow, Lenand Publ., 2011. 192 p.
8. Irikov V.A., Novikov D.A., Trenov V.N. *Tselostnaya sistema gosudarstvenno-chastnogo upravleniya innovatsionnym razvitiyem kak sredstvo udvoyeniya tempov vykhoda Rossii iz krizisa i postkrizisnogo rosta*. [The Complete System of State-Private Management of the Innovative Develop-

ment as Means of Doubling of Rates of an Exit of Russia from Crisis and Post-Crisis Growth]. Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences Publ., 2009. 228 p.

9. Burkova I.V., Dranko O.I., Kryukov S.V., Strukov A.Yu. [Dichotomizing Representation at Complex Assessment of the Enterprises]. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2010, vol. 6, no. 11, pp. 133–136. (in Russ.)

10. Burkov V.N., Burkova I.V., Popok M.V. [Method of Dichotomizing Programming]. *Management of Big Systems*, 2004, iss. 9, pp. 57–75. (in Russ.)

11. Glotov V.A. [Dichotomizing Decomposition of Multidimensional Function]. *Mekhanizmy funktsionirovaniya organizatsionnykh sistem. Teoriya i prilozheniya* [Mechanisms of Functioning of Organizational Systems. Theory and Applications]. Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences Publ., 1982, iss. 29, pp. 104–110. (in Russ.)

12. Burkov V.N., Budkov O.V., Karpov Yu.A. [Not Manipulated Mechanisms of Expert Estimates when Developing Regional Programs]. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2010, vol. 6, no. 11, pp. 144–147. (in Russ.)

13. Shchepkin A.V. [Rational Funding Mechanisms]. *Problems of Management*, 2018, no. 3, pp. 17–25. (in Russ.)

14. Burkova I.V. [Method of Network Programming in Problems of Nonlinear Optimization]. *Automatic Equipment and Telemechanics*, 2009, no. 10, pp. 15–21. (in Russ.)

15. Burkov V.N., Burkova I.V., Kitikov V.O., Fokin S.N. [Effective Algorithms of a Solution of a Problem of Integer Quadratic Programming]. *Trudy 8-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Tanayevskiye chteniya" (Minsk, 2018)*. [Works of the 8th International Scientific Conference "Tanayevsky Readings" (Minsk, 2018)]. Minsk, 2018, pp. 38–42. (in Russ.)

16. Burkov V.N., Korobets B.N., Minayev V.A., Shchepkin A.V. *Modeli, metody i mekhanizmy upravleniya nauchno-tekhnicheskimi programmami* [Models, Methods and Mechanisms of Management of Scientific and Technical Programs]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2017. 202 p.

17. Agzyamov R.A., Burkov V.N., Borkovskaya V.G., Nasonova T.V. [Management of Program Risks on the Basis of Quality Standards of their Characteristics]. *Economy and Management of Management Systems*, 2017, vol. 26, no. 4, pp. 42–49. (in Russ.)

18. Novikov D.A. *Stimulirovaniye v organizatsionnykh sistemakh* [Stimulation in Organizational Systems]. Moscow, Sinteg Publ., 2003. 312 p.

19. Burkov V.N., Burkova I.V., Shchepkin A.V. [Information Technologies of Development of Systems of Management of Global Safety]. *Strategic Priorities*, 2018, no. 1 (17), pp. 25–37. (in Russ.)

20. Burkov V.N., Kondrat'yev V.D., Shchepkin A.V. *Mekhanizmy povysheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya* [Mechanisms of Increase in Traffic Safety]. Moscow, 2011. 208 p.

Received 31 May 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Комплексный механизм управления развитием организации / В.Н. Бурков, А.В. Щепкин, К.Е. Амелина и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 79–93. DOI: 10.14529/ctr190308

FOR CITATION

Burkov V.N., Shchepkin A.V., Amelina K.E., Daulbaeva Z.M., Ryazantsev S.A. Complex Mechanism of Development Management of the Organization. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 79–93. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctr190308

АЛГОРИТМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАБЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

И.Е. Жигалов, О.И. Моногаров

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), г. Владимир, Россия*

Рассматривается проблема управления качеством изготовления кабельной изоляции на микроуровне. Существующий подход, представленный методом сканирования, в данной области не является достаточно эффективным, так как не позволяет лицу, принимающему решение (ЛПР), адекватно оценивать образующиеся экономические издержки. Для решения данной проблемы был разработан алгоритм, позволяющий оптимизировать данный процесс. В качестве критерия оптимальности использовался выигрыш, рассчитываемый как разница между экономическим эффектом, образующимся в результате регулирования параметров технологического процесса, и стоимостью управления. В свою очередь оценки экономического эффекта и стоимости управления производились на базе математического аппарата теории нечетких множеств и нечеткой логики, что позволило адаптировать модель принятия решений к индивидуальным особенностям предприятий отрасли. Преимуществом разработанного алгоритма также является его абсолютная сходимость, не дающая ему заикливаться в процессе оптимизации.

Представлены результаты численного моделирования, в ходе которого было проведено порядка ста экспериментов по управлению качеством кабельной изоляции с применением разработанного инструмента оптимизации. Результатом моделирования является зависимость усредненных значений исследуемого критерия от номера испытания, которая подтверждает адекватность разработанных информационно-аналитических и управленческих решений. Найденное решение соответствует экстремуму целевой функции и является оптимальным. В сравнении с существующим подходом принятия решений в данной области экономический выигрыш составил 14,68 %. При этом в зависимости от экономических оценок производительности и стоимости управления результаты существующего метода сканирования и описываемого алгоритма могут совпадать, однако в общем случае последний дает лучшие результаты.

Ключевые слова: управление качеством, кабельная промышленность, микродефекты, поддержка принятия решений.

Введение

На современном этапе значительная часть канализации электрической энергии осуществляется с применением высоковольтных кабелей. Основным преимуществом кабельных линий является их компактность и безопасность для окружающих. В то же время близкое расположение проводящих жил в кабельном изделии диктует высокие требования к качеству изготовления его электрической изоляции. Различные дефекты, неизбежно образующиеся в процессе производства, могут как существенно сократить срок службы самого кабеля, так и привести к возникновению аварийных ситуаций в электроустановках и электрических сетях высокого напряжения. Как показано в работах [1–5], образование дефектов непосредственно связано с параметрами технологического процесса, изменение которых позволяет управлять качеством производимой продукции.

Декомпозиция процесса управления позволяет выделить два принципиально отличных уровня, на каждом из которых решается своя задача. Первый уровень направлен на расчет параметров производственной линии при использовании математических моделей реологии и химии полимеров [6–8], что позволяет избежать грубых конструктивных дефектов и обеспечить соответствие механических, электрических и эксплуатационных характеристик кабельной продукции. Другой уровень предназначен для удержания в определённых границах степени развития микро-

дефектов, которые представляют собой всевозможные выступы, поры, микротрещины, усадочные раковины, примеси и различного рода диэлектрические включения внутри и на поверхности изоляции. Основной проблемой в осуществлении эффективного управления на данном уровне является отсутствие математических и статистических моделей, устанавливающих связь между параметрами производственной линии и степенью опасности образующихся микродефектов. Построение универсальных адекватных моделей для решения данной проблемы практически невозможно, так как на показатели качества продукции этого уровня влияет большое число индивидуальных факторов, зависящих от конструктивных особенностей оборудования, степени его износа, используемого сырья, систем контроля производственного процесса, мощности механических вибраций в цехе, запылённости и многих других. Ввиду указанных обстоятельств управление на данном уровне осуществляется итерационно, исходя из общих рекомендаций качественного характера, а шаг регулирования определяется на основе оценки экономических издержек лицом, принимающим решения. Для определения степени опасности образующихся в данном процессе микродефектов на этапе типовых испытаний проводятся измерение уровня частичных разрядов (ЧР) и исследование поверхности изоляционного материала под микроскопом. В процессе принятия решения о регулировании параметров технологического процесса ЛПР производит сопоставление типа наиболее развитого микродефекта и максимального зарегистрированного значения ЧР, что позволяет определить возможные параметры регулирования.

Эффективность такого управления является недостаточной, так как ЛПР не способен прогнозировать реакцию системы и адекватно оценивать экономические факторы в промежуточных точках, что отражается на увеличении экономических издержек, основными причинами которых являются падение производительности линии и стоимость управления. Последняя определяется как числом испорченных кабельных заготовок, так и недополучением прибыли в результате вывода из работы производственной линии. Таким образом, основную задачу по разработке такой системы можно сформулировать следующим образом: оптимизация определения параметров производственного процесса с учётом требований к качеству изоляции, минимизация издержек управления и увеличение производительности.

1. Математическая постановка задачи

В связи с тем, что связь между значениями параметров технологического процесса и степенью опасности микродефектов не может быть описана аналитически, решение поставленной задачи относится к классу задач многомерной условной экспериментальной оптимизации. Как уже было отмечено, управление системой в процессе поиска решения является весьма дорогостоящим, поэтому на практике поиск решения проводят только по одному параметру, регулирование которого не приводит к развитию микродефектов уже другого типа. В итоге задача многомерной оптимизации сводится к одномерной, которая может быть представлена системой:

$$\begin{cases} Q_d < Q_{lim}; \\ P \rightarrow \max; \\ C \rightarrow \min, \end{cases} \quad (1)$$

где Q_d – величина ЧР от микродефекта типа $d \in D$; Q_{lim} – предельно допустимая величина ЧР; P – производительность технологического процесса; C – стоимость управления (зависит от числа экспериментов). Кроме того, о поставленной задаче можно сказать, что она относится к классу одноэкстремальных, так как функция $P(p)$ является строго убывающей при уменьшении (увеличении) некоторого параметра p , а C – строго возрастающей при увеличении числа экспериментов.

2. Методология решения

Обычно данная задача решается методом сканирования [9–11] с шагом, соответствующим некоторым узловым точкам в оценке допустимости снижения производительности. Тогда в качестве решения принимается первое, удовлетворяющее требованиям качества. Данный подход не является достаточно эффективным, так как не позволяет оптимизировать экономические издержки от потери производительности и стоимость экспериментального исследования. Для совершенствования существующего метода предлагается ввести экономический критерий оптимальности найденного решения pC , рассчитываемый по следующей формуле:

$$pC = \tilde{P} - \tilde{C}, \quad (2)$$

где \tilde{P} – нечеткая оценка экономического эффекта рассматриваемого уровня производительности; \tilde{C} – нечеткая оценка стоимости управления. Сущность формулы (2) заключается в определении выигрыша от увеличения производительности и затрат, связанных с экспериментированием. Для обеспечения экономической целесообразности продолжения поиска наилучшего решения должно выполняться условие

$$pC_+ > pC_{end}, \quad (3)$$

где pC_+ – прогнозируемое значение pC -критерия; pC_{end} – значение pC -критерия последнего найденного решения.

Операция сравнения нечетких чисел в (3) содержит в себе неопределенность, которая разрешается использованием математического аппарата теории игр. В работе [12] данная задача сводится к сравнению двух отрезков при разложении каждого из нечетких чисел по α -уровням. В результате обобщения критериев принятия решения авторами [12] был определен функционал, которым должно руководствоваться ЛПР при сравнении двух альтернатив:

$$(1 - v)g_i(\alpha) + vG_i(\alpha) \rightarrow \max, \quad i = 1, 2, v [0; 1], \quad (4)$$

где $g(\alpha)$ – левая граница отрезка на выбранном α -уровне; $G(\alpha)$ – правая граница отрезка на выбранном α -уровне. Функционал (4) максимизирует ожидаемый доход выбранного решения c_α , величина v характеризует вероятность состояния $G(\alpha)$ системы. Далее производится суммирование по всем α -уровням и совокупный ожидаемый доход принимает вид

$$c = \int_0^1 c_\alpha d\alpha = \int_0^1 ((1 - v)g(\alpha) + vG(\alpha)) d\alpha.$$

Соответственно получаем, что нечеткое число pC_+ больше нечеткого числа pC_{end} тогда и только тогда, когда $c(pC_+) > c(pC_{end})$.

Для оценки pC -критерия на каждом этапе принятия решения выполняется нечеткая аппроксимация суждений ЛПР об экономическом эффекте уровня производительности и стоимости управления методом изолиний в узловых точках, соответствующих терм-множеству, представленному в таблице.

Терм-множество оценки суждений ЛПР

№	Лингвистическая переменная	Ядро нечеткого множества b
1	«очень высокий»	0,875
2	«высокий»	0,750
3	«выше среднего»	0,625
4	«средний»	0,500
5	«ниже среднего»	0,375
6	«низкий»	0,250
7	«очень низкий»	0,125

В качестве функции принадлежности для данных множеств используется симметричная гауссова функция вида:

$$\mu(x) = \exp\left[-\left(\frac{x - b}{a}\right)^2\right],$$

где b – ядро нечеткого множества; a – параметр ширины.

После введения ЛПР соответствующих данных строятся нечеткие функции, аппроксимирующие суждения ЛПР, что позволяет оценить значение pC -критерия в любой промежуточной точке.

Дальнейшая работа системы строится согласно алгоритму, блок-схема которого представлена на рис. 1.

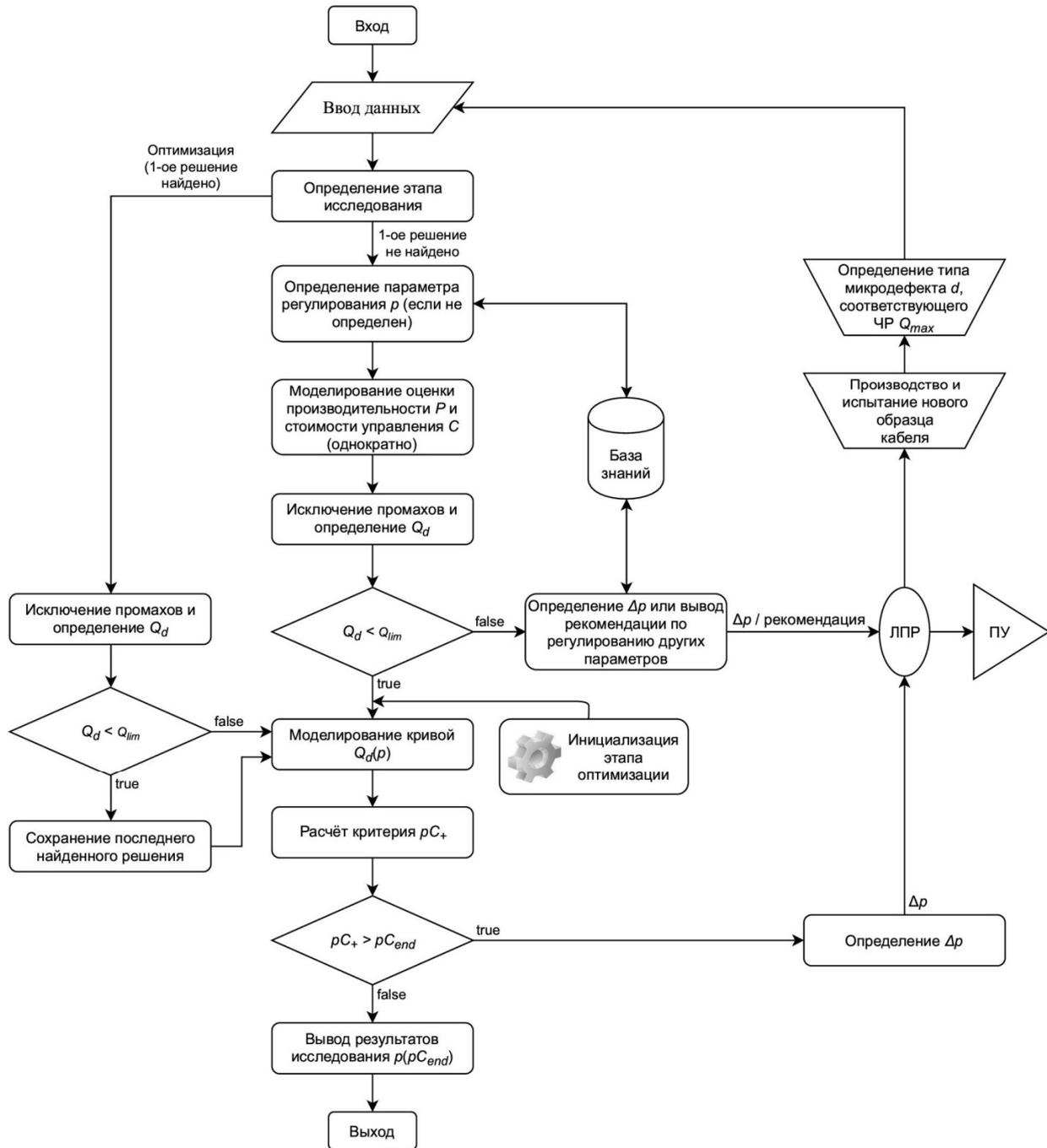


Рис. 1. Блок-схема алгоритма системы поддержки принятия решений

В начале своей работы после ввода исходных данных на основе имеющейся базы знаний, содержащей информацию о параметрах технологического процесса, влияющих на различные типы микродефектов, системой выбирается параметр регулирования p , изменение которого влияет на микродефект типа d и производительность линии, но является индифферентным по отношению к другим показателям качества.

Далее производится однократное моделирование экономической оценки производительности P и стоимости управления C на основе оценок ЛПР лингвистических переменных, представленных в таблице. Полученные данные по измерению ЧР проверяются на наличие промахов на основе непараметрической модели типа «ящик с усами», после чего рассчитывается максимальное значение ЧР Q_d как среднее максимальных значений ЧР по всем измерениям текущего испытания. Здесь следует обратить внимание на то, что, несмотря на присутствие шумовых воздей-

вий, в качестве результата измерения ЧР принимается максимальное зарегистрированное значение. Данное обстоятельство связано с высокой ценой ошибки, что накладывает на ЛПП обязанность руководствоваться критерием крайнего пессимизма при принятии решений. На практике это означает то, что параметры технологического процесса подбираются с хорошим запасом, обеспечивающим высокое качество производимой продукции.

На следующем этапе работа алгоритма повторяет существующий метод сканирования, выдавая значения регулируемого параметра p , соответствующие узловым точкам экономической оценки производительности P в порядке уменьшения. Так продолжается до тех пор, пока не будет найдено первое решение, то есть удовлетворяющее условию $Q_d < Q_{lim}$, или не будут проверены все точки. Если решение так и не было найдено, то производится запрос к базе знаний, которая выдаёт рекомендацию по регулированию других параметров и управление передаётся на первый уровень, на котором должна быть пересчитана вся модель производственного процесса.

Если же первое решение было найдено, то проводится моделирование кривой $Q_d(p)$. Методология моделирования зависит от имеющегося числа точек. Минимальное значение экспериментальных точек равно двум: исходная точка и точка, полученная на первом шаге. В этом случае строится линейная интерполяция. Если же точек будет более двух, то выполняется экспоненциальная аппроксимация.

Полученная модель кривой $Q_d(p)$ позволяет спрогнозировать величину образующегося максимального ЧР и получить соответствующее значение параметра p . Далее в соответствии с найденным значением p по формуле (2) рассчитывается прогнозируемое значение pC -критерия pC_+ . Если pC_+ оказывается больше своего значения для последнего найденного решения pC_{end} , то проводится контрольное испытание, которое должно подтвердить правильность выбранного значения исследуемого параметра. Если по его результатам соблюдается условие $Q_d < Q_{lim}$, то принятое в нем значение p принимается в качестве последнего найденного решения. Затем с учетом новой точки заново проводится моделирование $Q_d(p)$, строится новый прогноз и рассчитывается pC -критерий, по которому снова будет приниматься решение о целесообразности дальнейшего экспериментирования.

Описанный алгоритм имеет абсолютную сходимость, что доказывается весьма просто. Функция стоимости управления $\tilde{C}(n)$ является бесконечно возрастающей неограниченной функцией, соответственно

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (\tilde{C}(n)) = \infty.$$

В то же время при поиске решения системы (1) значение функции $\tilde{P}(p)$ будет заключено в пределах между найденным решением в некоторой узловой точке на шаге i и предшествующей узловой точкой на шаге $i-1$, тогда

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (\tilde{P}(p)) = \text{const}.$$

Поскольку бесконечно большая величина всегда больше ограниченной, то значение pC -критерия на некотором i -м шаге обязательно начнет снижаться и поиск решения будет остановлен.

3. Научная новизна

В данной работе предложен алгоритм управления поиском оптимального значения параметра регулирования технологического процесса производства кабельной изоляции, обеспечивающий требуемый уровень качества в испытаниях на ЧР. Преимуществом разработанного алгоритма по сравнению с существующим подходом является оптимизация затрат между стоимостью управления качеством и доходом от увеличения производительности на основе математического аппарата теории нечеткой логики и нечетких множеств. В качестве критерия оптимальности был введен pC -критерий, рассчитываемый по формуле (1) на каждом шаге процесса оптимизации. Как было показано выше, описанный алгоритм имеет абсолютную сходимость, что позволяет его использовать без риска заклинивания процесса поиска решения.

4. Результаты численного моделирования

Рассмотрим работу алгоритма на примере управления качеством изготовления кабельной изоляции при обнаружении ЧР, вызванных шероховатостью поверхности изоляции жилы. Пусть мы имеем следующую априорную информацию.

1. Кривая истинных значений ЧР $Q(p)$ (рис. 2).

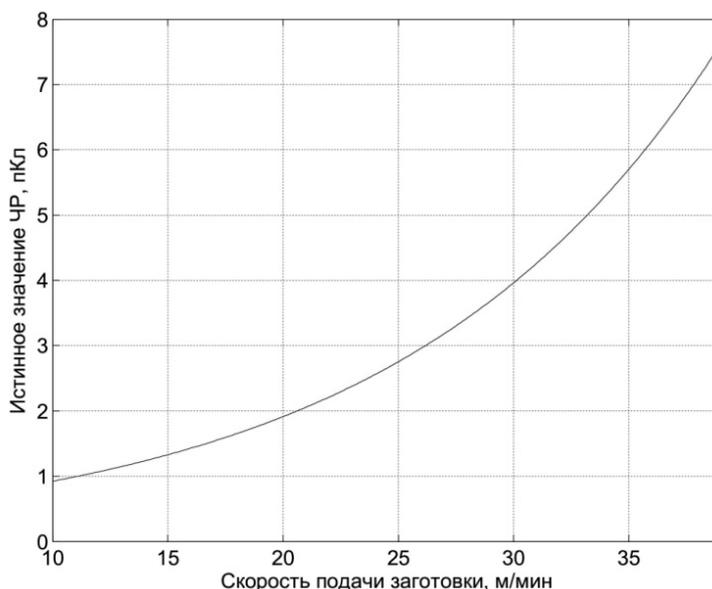


Рис. 2. Кривая истинных значений ЧР $Q(p)$

2. Статистическая модель измерения амплитуды импульсов ЧР Q , которая в соответствии с [13] имеет вид:

$$Q = -k_g \frac{a_0 + a'}{\omega e^{-\alpha(x_{01} + \Delta t_s)}}; \quad (5)$$

$$\Delta t_s = -\frac{b_0 + b'}{a_0 + a'} + \frac{b_0}{a_0},$$

где k_g – градуировочный коэффициент; x_{01} – x -координата первой четверти периода переходного процесса; ω – угловая частота переходного процесса; Δt_s – ошибка начального момента переходного процесса; a_0, b_0 – истинные значения коэффициентов касательной к сигналу в точке x_{01} ; a', b' – случайные величины, являющиеся коэффициентами вспомогательной линейной функции.

Здесь отметим, что описание модели (5) является отдельной темой и не является целью настоящего исследования. Однако для понимания её общей концепции добавим, что амплитуда ЧР определяется исходя из уравнения касательной к графику сигнала в точке x_{01} и статистических характеристик шумового процесса.

3. Вероятность первичного наложения импульсов – 20 %.

4. Условная вероятность наложения импульсов в зоне от начала первого импульса до завершения первого полупериода переходного процесса – 4 %.

5. Число анализируемых полупериодов испытательного напряжения – 10.

Требуется построить и проанализировать зависимость усредненных значений pC -критерия от числа испытаний, а также определить в процентном соотношении экономический выигрыш при использовании разработанного алгоритма.

В процессе его функционирования были построены нечеткие модели оценки производительности и стоимости управления, представленные на рис. 3.

При построении представленных зависимостей, а также при расчете pC -критерия по формуле (2) использовался математический аппарат теории нечетких множеств и нечеткой логики [14, 15].

В результате проведения 100 численных экспериментов была построена усредненная зависимость $pC(n)$, изображенная на рис. 4.

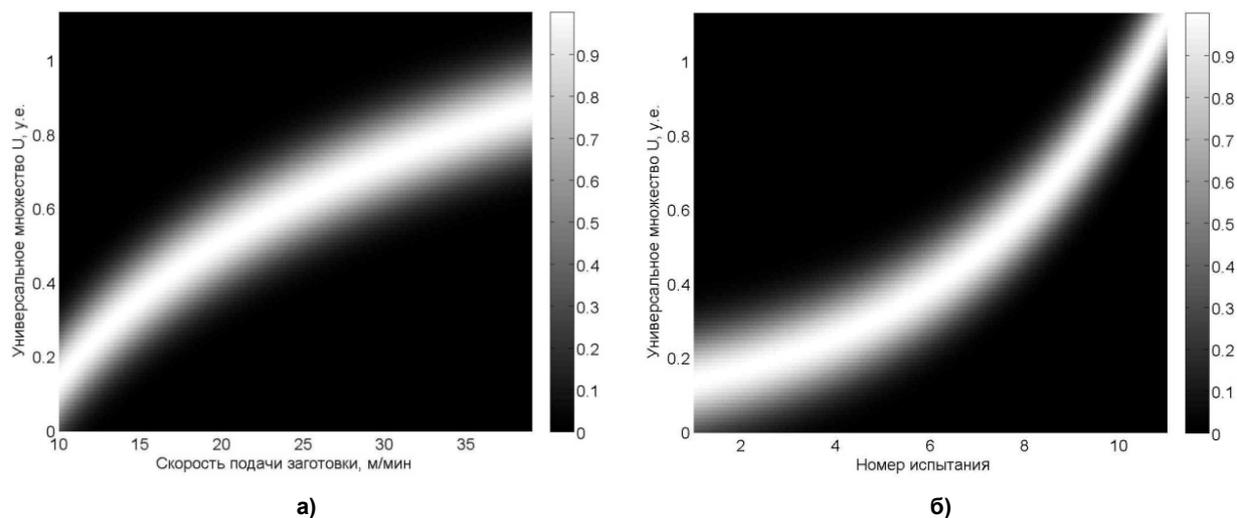


Рис. 3. Нечеткие функции оценки: а – оценки экономического эффекта производительности технологического процесса; б – стоимости управления

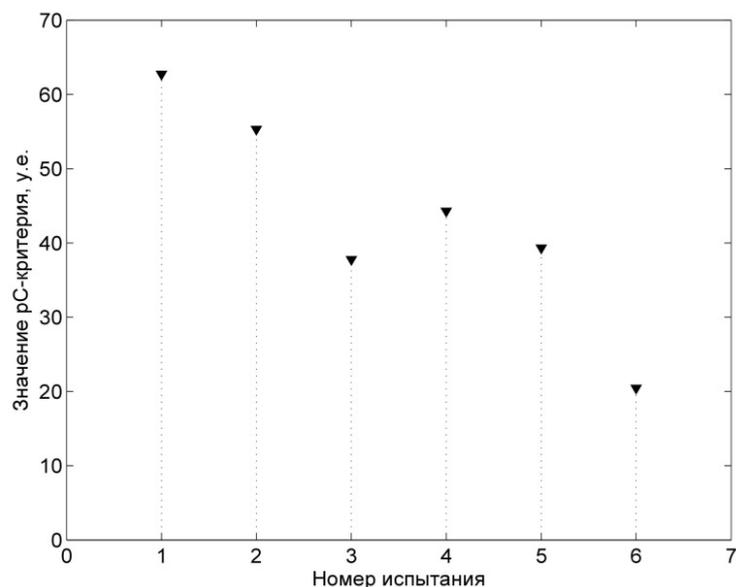


Рис. 4. Зависимость pC-критерия от номера испытаний

5. Анализ полученных результатов

Анализируя представленный график, можно проследить процесс поиска оптимального решения: 1) сначала следовал поиск первого решения, удовлетворяющего условию $Q_d < Q_{lim}$; данное решение было найдено на третьей итерации; 2) далее был инициирован этап оптимизации, в результате которого производительность производственного процесса была увеличена, что сопровождается ростом значения pC-критерия; 3) на итерациях 5 и 6 производилось уточнение искомого параметра p , однако, как видно из графика, данные действия были экономически нецелесообразны и сопровождалось падением значений pC-критерия. В соответствии с построенной зависимостью четвертая итерация соответствует точке экстремума графика после нахождения первого решения, из чего следует, что найденное на ней решение является оптимальным. В процентном соотношении экономический выигрыш составил 14,68 %.

Вывод

Подводя итог проделанной работе, можно заключить, что разработанный нами алгоритм по экономическим показателям выигрывает у существующего подхода. Однако следует отметить, что в зависимости от экономической оценки производительности и стоимости управления ре-

зультаты его работы могут и совпадать с результатами, полученными традиционным методом. Тем не менее в общем случае разработанный нами алгоритм дает лучшие результаты и может быть применен на предприятиях отрасли для оптимизации экономических издержек в процессе управления качеством производимой продукции.

Литература

1. Образцов, Ю.В. Силовые кабели среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. Факторы качества / Ю.В. Образцов, А.А. Фрик, А.А. Сливов // *Кабели и провода*. – 2005. – № 1. – С. 9–13.
2. Леонов, А.П. Выявление дефектов кабелей и проводов при испытаниях по категории ЭИ-2 / А.П. Леонов, В.В. Редько // *Кабели и провода*. – 2015. – № 1. – С. 15–20.
3. Баринов, В.М. Входной контроль качества кабельной продукции / В.М. Баринов, А.В. Прошин, Н.Н. Соловьев // *Кабели и провода*. – 2016. – № 6. – С. 16–18.
4. Bessissa, Lakhdar. Influence of Fuzzy Parameters on the Modeling Quality of XLPE Insulation Properties under Thermal Aging / Lakhdar Bessissa, Larbi Boukezzi, Djillaly Mahi // *Fuzzy Information and Engineering*. – 2016. – Vol. 8, iss. 1. – P. 101–112. DOI: 10.1016/j.fiae.2016.03.006
5. Starikova, N.S. The analysis of factors affecting the quality of cable insulation control carried out with the complex method / N.S. Starikova, V.V. Redko // *WSEAS Transactions on Systems and Control*. – 2016. – Vol. 11. – P. 39–44.
6. Краннхфельд, Л.И. Теория, расчет и конструирование кабелей и проводов: учеб. для техникумов / Л.И. Краннхфельд, И.Б. Рязанов. – М.: Высшая школа, 1972. – 384 с.
7. Малкин, А.Я. Реология: концепции, методы, приложения: пер. с англ. / А.Я. Малкин, А.И. Исаев. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2010. – 560 с.
8. Головкин, Г.С. Проектирование технологических процессов изготовления изделий из полимерных материалов / Г.С. Головкин. – М.: Химия: КолосС, 2007. – 399 с.
9. Ganguli, Sushil Kumar. Power Cable Technology / Sushil Kumar Ganguli, Vivek Kohli. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 427 p.
10. Холодный, С.Д. Методы испытаний и диагностики в электроизоляционной и кабельной технике: учеб. пособие / С.Д. Холодный, С.В. Серебрянников, М.А. Боев. – М.: Издат. дом МЭИ, 2009. – 232 с.
11. Григорьян, А.Г. Технология производства кабелей и проводов с применением пластмасс и резин / А.Г. Григорьян, Д.Н. Дикерман, И.Б. Пешков; под ред. И.Б. Пешкова: учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 2011. – 368 с.
12. Ухоботов, В.И. О сравнении нечетких чисел в задачах принятия решений / В.И. Ухоботов, Е.С. Михайлова // *Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки*. – 2016. – Т. 26, № 1. – С. 87–94. DOI: 10.20537/vm160108
13. Моногаров, О.И. Определение порогового значения при различении наложений импульсов частичных разрядов методом последовательного анализа экстремумов / О.И. Моногаров // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2018. – № 12. – С. 24–29.
14. Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление: пер. с англ. / А. Пегат. – 3-е изд. (эл.). – Электрон. текстовые дан. (1 файл pdf : 801 с.). – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – (Адаптивные и интеллектуальные системы).
15. Галлямов, Е.Р. Компьютерная реализация операций с нечеткими числами / Е.Р. Галлямов, В.И. Ухоботов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика»*. – 2014. Т. 3, № 3. – С. 97–108.

Жигалов Илья Евгеньевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой информационных систем и программной инженерии, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), г. Владимир; ikgij@vlsu.ru.

Моногаров Олег Игоревич, соискатель кафедры информационных систем и программной инженерии, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), г. Владимир; Olegmngarv@rambler.ru.

Поступила в редакцию 16 апреля 2019 г.

THE ALGORITHM OF DECISION SUPPORT IN QUALITY GOVERNANCE OF THE CABLE INSULATION MANUFACTURE

I.E. Zhigalov, ikgij@vlsu.ru,

O.I. Monogarov, Olegmngarv@rambler.ru

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VISU),
Vladimir, Russian Federation

In this article the quality governance issue of the cable insulation manufacture at the micro level is considered. The existing approach, presented by scanning method, in this field is not effective enough, because it does not allow the decision maker (DM) to adequately assess the occurring economic costs. To address this problem the algorithm, optimizing this process, was developed. As an optimality criterion the gain, calculated as the difference between the economic benefit, resulting from regulation of technological process, and the cost of governance, was used. In turn evaluations of the economic benefit and the cost of governance have been made on the basis of the theory of fuzzy sets and fuzzy logic, that has allowed to adapt the decision making model to individual conditions of the industry members. Also the advantage of developed algorithm is its absolute convergence, which prevents to looping of the optimization process.

Also the article presents the results of numerical simulations, where about one hundred quality governance experiments of cable insulation, using the developed optimization tool, were held. The simulation result is the dependence between average values of investigated criterion and test number, which confirmed the adequacy of developed information-analytical and governance solutions. The found solution corresponds to the extremum of the loss function and is the optimal. In compare with the existing approach of decision-making in this field the economic gain was 14,68 %. In doing so, depending on economic evaluations of the productivity and the cost of governance the results of the existing scanning method and the described algorithm may coincide, but generally the last one produce better results.

Keywords: quality governance, cable industry, microdefects, decision support.

References

1. Obratsov Ju.V., Frik A.A., Slivov A.A. [Medium Voltage Cables with XLPE Insulation. Quality Factors]. *Cables and Wires*, 2005, no. 1, pp. 9–13. (in Russ.)
2. Leonov A.P., Red'ko V.V. [The Defect Detection of Cables and Wires in Tests for Categories EI-2]. *Cables and Wires*, 2015, no. 1, pp. 15–20. (in Russ.)
3. Barinov V.M., Pronin A.V., Solov'ev N.N. [Incoming Quality Control of Cable Products]. *Cables and Wires*, 2016, no. 6, pp. 16–18. (in Russ.)
4. Lakhdar Bessissa, Larbi Boukezzi, Djillaly Mahi. Influence of Fuzzy Parameters on the Modeling Quality of XLPE Insulation Properties under Thermal Aging. *Fuzzy Information and Engineering*, 2016, vol. 8, iss. 1, pp. 101–112. DOI: 10.1016/j.fiae.2016.03.006
5. Starikova N.S., Red'ko V.V. The Analysis of Factors Affecting the Quality of Cable Insulation Control Carried out with the Complex Method. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 2016, vol. 11, pp. 39–44.
6. Krannhfel'd L.I., Ryazanov I.B. *Teoriya, raschet i konstruirovaniye kabeley i provodov* [The Theory, Calculation and Design of Cables and Wires]. Moscow, High School Publ., 1972. 384 p.
7. Malkin A.Ya., Isaev A.I. *Reologiya: konceptsii, metody, prilozheniya* [Rheology: Concepts, Methods and Application]. St. Petersburg, Profession Publ., 2010. 560 p.
8. Golovkin G.S. *Proektirovaniye tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniya izdeliy iz polimernykh materialov* [The Design of the Technological Process for Producing Wares from Polymer Materials]. Moscow, Chemistry Publ., EarS Publ., 2007. 399 p.
9. Sushil Kumar Ganguli, Vivek Kohli. *Power Cable Technology*. Boca Raton, CRC Press, 2016, 427 p.

10. Holodnyy S.D. *Metody ispytaniy i diagnostiki v ehlektroizolyatsionnoy i kabel'noy tekhnike* [The Test and Diagnostic Methods into Electrical Insulation Technology and Cables]. Moscow, MEI Publ., 2009. 232 p.

11. Grigor'yan A.G., Dikerman D.N., Peshkov I.B. *Tekhnologiya proizvodstva kabeley i provodov s primeneniem plastmass i rezin* [The Technological Process for Producing Cables and Wires with Plastic and Rubber]. Moscow, Machinery Publ., 2011. 368 p.

12. Ukhobotov V.I., Mihaylova E.S. [Comparison of Fuzzy Numbers in Decision-Making Problems]. *The Bulletin of Udmurt University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, 2016, vol. 26, no. 1, pp. 87–94. (in Russ.) DOI: 10.20537/vm160108

13. Monogarov O.I. [The Finding of a Threshold for Discrimination of PD Pulses Overlays Using the Method Based on an Analysis of the Sequence of Extrema]. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2018, no. 12, pp. 24–29. (in Russ.)

14. Pegat A. *Nechotkoe modelirovanie i upravlenie* [Fuzzy Modeling and Control], Moscow, Binom. Knowledge laboratory, 2015. 801 p.

15. Gallyamov E.R., Ukhobotov V.I. [Computer Implementation of Operations with Fuzzy Numbers]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computational Mathematics and Software Engineering*, 2014, vol. 3, no. 3, pp. 97–108. (in Russ.)

Received 16 April 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Жигалов, И.Е. Алгоритм поддержки принятия решений в управлении качеством изготовления кабельной изоляции / И.Е. Жигалов, О.И. Моногаров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 94–103. DOI: 10.14529/ctcr190309

FOR CITATION

Zhigalov I.E., Monogarov O.I. The Algorithm of Decision Support in Quality Governance of the Cable Insulation Manufacture. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 94–103. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190309

ОЦЕНКА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПРОЕКТОВ: НЕОСИСТЕМНЫЙ ПОДХОД

Е.Б. Кибалов¹, Д.Д. Шибикин²

¹ Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, г. Новосибирск, Россия,

² Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Россия

Проблема оценки общественной эффективности крупномасштабных железнодорожных проектов (далее КПЖД) рассматривается в настоящей статье в свете системной парадигмы Я. Корнаи и ее инструментальной конкретизации как неосистемного подхода. В этом контексте КПЖД анализируются как большие и сложные социотехнические системы. В качестве объектов исследования выступают Ленско-Камчатская и Приполярная железнодорожные магистрали, находящиеся на стадии прединвестиционных обоснований в первом случае и частичной реализации во втором, когда неопределенность затрат и результатов чрезвычайно высока. Для оценки сравнительной эффективности названных проектов были использованы компьютерные продукты – зарубежные и отечественные, предназначенные для работы в рамках теории принятия сложных решений с полувербальными моделями и экспертной информацией. Вычислительные эксперименты показали, что разные компьютерные продукты как средства поддержки процедур принятия инвестиционных решений дают аналитикам неодинаковые рекомендации о предпочтительности сравниваемых проектов. Показано, что причина заключается в неадекватном учете в зарубежных продуктах (применительно к крупномасштабным проектам) фактора неопределенности. Делается вывод о продуктивности инструментария неосистемного подхода, реализованного авторами статьи, в качестве интегратора вербальных и математических моделей при оценке крупномасштабных проектов в ситуации неопределенности.

Ключевые слова: крупномасштабный железнодорожный проект, системная парадигма, неосистемный подход, компьютерный продукт, Ленско-Камчатская магистраль, Приполярная магистраль, критерии теории принятия решений.

Проблема оценки общественной эффективности крупномасштабных железнодорожных проектов (далее КПЖД) рассматривается в настоящей статье в свете системной парадигмы Я. Корнаи [1]. В работах Г.Б. Клейнера [2, 3] она была развита в форме новой методологии применения системного инструментария в экономических исследованиях (как теория «среднего» уровня [4]) и получила название «неосистемный подход» [2]. Наша исходная позиция состоит в анализе КПЖД как большой и сложной социотехнической системы, и поэтому термин «неосистемный подход» вынесен в название статьи, а ее содержание акцентировано на сравнении характеристик системного подхода «без» – и с приставкой «нео» на конкретном примере.

Я. Корнаи в своей парадигме предлагает построить систему оценки «великих, уникальных, неповторяющихся социальных изменений» скачкообразного типа, которую, на наш взгляд, следует назвать в соответствии с объектом оценки глобальной. Ее ключевым положением является интегративный принцип при оценке последствий подобных мегаизменений, вносимых в сложившийся внутригосударственный, а также мировой социальный порядок. Новая парадигма не сводится к какой-либо частной дисциплине, будь то экономика, социология или политология. Названные дисциплины предлагается рассматривать как комплексную «всеобъемлющую, цельную общественную науку» и особое внимание при этом уделять взаимодействию различных сфер функционирования общественной системы (не только экономики и политики, но также культуры, идеологии и истории). Это отличает парадигму Корнаи от иных системных парадигм, которые по своей сути (за исключением марксистской и ее модификаций) всего лишь междисциплинарны, а в большинстве случаев, как например методики «затраты – выгоды» и «стоимость – эффективность», опираются на постулаты экономической теории (см., например, [5, 6]).

Б.Г. Клейнер в своей трактовке неосистемного подхода также ограничивает степень глобальности системной парадигмы Корнаи уже в названии предлагаемой методологии, декларируя ее экономическое первородство и тем самым сужая общесистемный смысл парадигмы. Для оценки общественной эффективности КПЖД такое обеднение состава эффектов (прямых и косвенных), порождаемых крупномасштабными проектами, приводит к недооценке их роли как драйверов активизации экономического роста экономики и благосостояния социума. Конкретно из-за неразвитости, например, системы железных дорог на Дальнем Востоке России падает качество жизни дальневосточников и в ситуации санкций затруднен маневр по усилению торгово-экономических связей со странами АТР. Первое ведет к обезлюдиванию суверенных территорий России, второе чревато международной изоляцией страны, а все вместе угрожает ее национальной безопасности.

Для теоретического анализа в рамках системной парадигмы Я. Корнаи не характерно использование математических моделей, в частности эконометрических. Эти модели отличаются высоким уровнем абстракции, и по необходимости работающие с ними ученые вынуждены исследовать узкий «кусочек реальности» в ущерб системной полноте исследования. Напротив, сторонники системной парадигмы ради полноты готовы серьезно поступиться научной строгостью и точностью. В методологии Клейнера вопрос ставится более кардинально. Предлагается считать, что основное отличие новой системности (неосистемного подхода) от старой состоит в отказе от математической теоретико-множественной (эндогенной) основы систем и в переходе к структурной (экзогенной), в основе своей философской, теории систем.

Здесь следует подчеркнуть, что проблема соотношения теоретико-множественного и системного подхода не нова и обсуждается последние 40 лет в трудах отечественных и западных ученых. На уровне качественных определений идея множества как «многое, мыслимое как целое» состоит в том, что в ней сущность целого сводится к сущности элементов множества. В системном подходе, наоборот, «целое мыслится как многое». Конструктивный вывод как результат многолетних дискуссий, с которым авторы настоящей статьи согласны, состоит в том, что оба подхода взаимодополнительны, а системные аналитики при оценке КПЖД «обязаны владеть теоретико-множественным аппаратом во всей его строгости и математической мощи» [7, с. 72, 83].

В описании системной парадигмы Корнаи и методологии Клейнера по непонятным причинам фактор неопределенности, тотально влияющий на принятие сложных решений на всех уровнях общественного устройства современного мира, прямо не упоминается, а обсуждается, если можно так выразиться, метафорически. Относительно предсказательной силы инструментария системной парадигмы сам Корнаи отзывается скептически, т. е. ставит под сомнение его способность вскрыть неопределенности будущего. Он считает, что ожидаемый результат применения нового подхода пока не достигнут, а весьма скромные результаты «получены с большой степенью неведения», т. е. они по-прежнему неопределенны и пользоваться ими в практических приложениях следует с осторожностью.

В свою очередь Клейнер в предложенной методологии понятие неопределенности развития систем мезоуровня – объектов и проектов – вводит через понятие плохо предсказуемого взаимодействия четырех «джиннов»: вариативности, перемен, однообразия и застоя. Оставляя в стороне религиозные трактовки термина «джинн», укажем на его происхождение от арабского слова «джана» – скрытый. Действительно, будущее, образно выражаясь, скрыто от лиц (и организаций), принимающих решения, завесой неопределенности. Как эту завесу сделать более прозрачной, в методологии прямо не обсуждается, хотя делается два важных методических вывода, существенных для понимания особенностей КПЖД: а) типовой продукт (услуга) этой проектной системы – преобразование экономической системы, вмещающей проектную систему, б) эксклюзивный – нарушение гомогенности пространственно – временной среды проекта, что генерирует неопределенность при оценке эффективности проекта.

Выводы в прикладном аспекте служат ориентирами для постановки проблемы оценки крупномасштабных инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте с учетом фактора неопределенности. Решение непростых задач, возникающих в этой связи, облегчается тем, что к настоящему времени наукой, если судить по литературе вопроса, проблема недетерминированности внутренних и внешних связей крупномасштабных и сложных систем осознана достаточно глубоко и давно (см., например, [8]). Тем не менее понимание того, что специфика объекта

ным нами в разработке ASPER-D (Automatic System of Process Expert Range Dialogue – система автоматической обработки экспертных суждений в режиме диалога) для решения тех же проблем, что и Expert Choice. Но поскольку описание ASPER-D ранее не публиковалось, приведем его в нижеследующей врезке.

Методические основы ASPER-D базируются на ключевых понятиях системного анализа: дерево целей, альтернативы, экспертные оценки, система для решения проблем. Проблемы, для разрешения которых предназначен продукт, являются слабоструктурированными, т. е. значительная часть переменных и параметров, характеризующих конкретную проблему, описываются либо вербально, либо в порядковых шкалах. Количественные описания также имеют место, но они не преобладают. Методический подход, использованный в ASPER-D, вытекает из особенностей слабоструктурированных проблем, а именно:

1. Радикальная неопределенность проблемы. На первом этапе «вскрывается» с помощью дерева целей. Вскрытие происходит постепенно, по этапам структуризации:

а) в шкале классификационной – когда разрабатывается структура дерева целей;

б) в шкале порядковой – когда вершины дерева целей упорядочиваются по важности для достижения подцелей;

в) в шкале количественной – когда порядковые шкалы трансформируются в количественные с использованием коэффициентов относительной важности, нормированных к единице на каждом уровне дерева целей.

2. Альтернативные варианты решения проблемы. Разрабатываются экспертами как вербальные описания взаимоисключающих вариантов решения проблемы. Описание альтернатив должно быть компактным и контрастным, а число аспектов в описании альтернативы должно соответствовать числу аспектов проблемы, структурированных в дереве целей.

3. Сценарии развития внешней среды оцениваемых альтернатив описываются вербально как сценарии-контрасты. Минимальное число сценариев три: оптимистический, пессимистический, наиболее вероятный.

4. Оценочная матрица. По результатам реализации трех предыдущих этапов формируется оценочная матрица, строки которой есть оцениваемые альтернативы, а столбцы – сценарии-контрасты. Элементами матрицы являются исходы актуализации пары «альтернатива – сценарий», где численное значение исхода определяется на основе экспертных суждений.

5. Правила выбора наиболее предпочтительных альтернатив. Предпочтительные альтернативы выбираются по оценочной матрице на основании критериев: Вальда, Сэвиджа, максимакса, Гурвица, обобщенного критерия Гурвица – в случаях радикальной неопределенности и Байеса – Лапласа – для случаев неопределенности вероятностной.

6. Проверка согласованности экспертных суждений. Осуществляется по каждой оценочной процедуре с помощью коэффициента конкордации сравниваемого с табличной нормой, при заданном уровне альфа.

Отметим, что в сравниваемых методиках на этапе целевой структуризации сложной проблемы комплексной оценки проектов в основу положена одна и та же математическая структура – иерархия. Такой подход означает, что системный анализ начинается с целей и критериев их достижения, обеспечиваемого разными проектами в разной степени. И дело не только (и не столько) в том, что в обеих методиках с помощью одной и той же математической структуры строится полупормальная модель системы целей, именуемая деревом целей. Суть в том, что на первоначальных исходных стадиях осуществления проекта во главу угла ставится и с помощью дерева целей по возможности решается задача «вскрытия» так называемой целевой неопределенности, порождаемой нестабильностью внешней среды проекта, неоднородностью критериев оценки и некомпетентностью лиц (или организаций), проект иницирующих. Последнее преодолевается на основе экспертных и компьютерных технологий, оцифровывающих экспертные суждения и дающих возможность использовать компьютеры как усилители интеллекта аналитиков и лиц, принимающих решения.

Чтобы продемонстрировать не только общность двух сравниваемых далее методик, но и неодинаковость подходов к построению оценочной системы «дерево целей – проекты», обратимся к рис. 2 и 3.

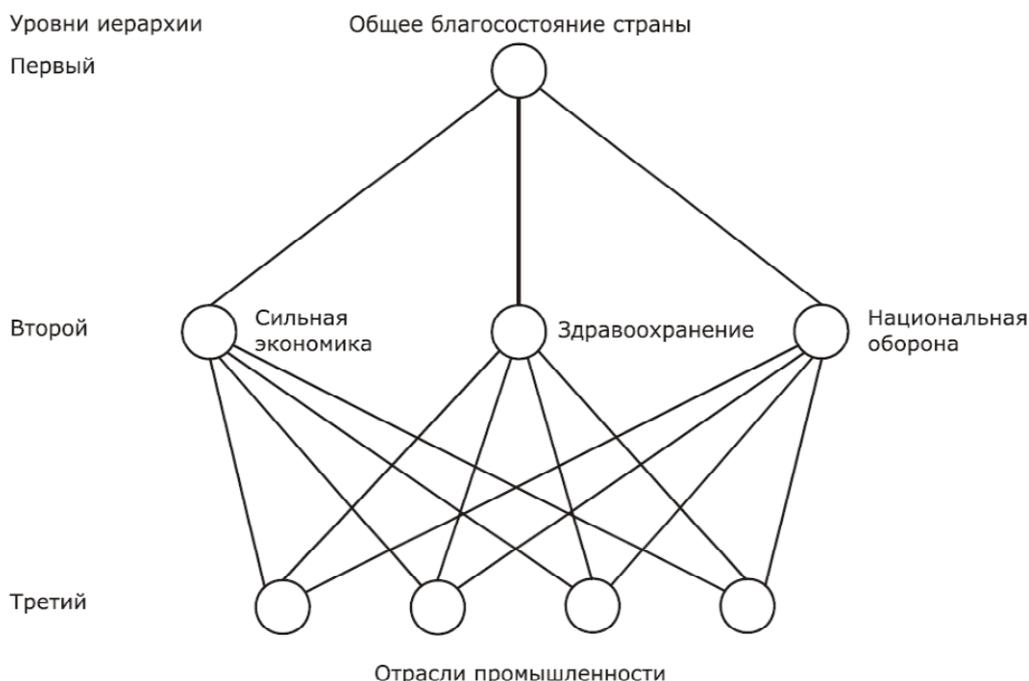


Рис. 2. Схема решения проблемы оценки в Expert Choice

Чтобы продемонстрировать, как это делается в ASPER-D, и на конкретном примере сравнить результаты, полученные по указанным методикам при оценке одних и тех же проектов, обратимся сначала к рис. 1. Изображенные на нем КПЖД – Приполярная и Ленско-Камчатская магистрали – являются объектами оценки их сравнительной эффективности, а полученные с помощью программных продуктов ASPER-D и Expert Choice результаты далее комментируются.

Начнем с демонстрации дерева целей в ASPER-D (см. рис. 3) как основы целевой структуризации процедур оценки, формирования системы оценочных критериев и многомерной функции ценности сравниваемых проектов. Дерево целей строится экспертами в назывной шкале в процессе «мозгового штурма» и соответствующая информация вводится для дальнейшей обработки. Система процедур ASPER-D на основе экспертных оценок выявляет наиболее предпочтительную альтернативу из числа оцениваемых: в нашем случае это КПЖД – Приполярная или Ленско-Камчатская магистраль.

Для разъяснения процедур ASPER-D в смысле их отличия от процедур Expert Choice подчеркнем, что сначала в ASPER-D оценивается не вектор коэффициентов относительной важности (КОВ) целей, а матрица отношений этих коэффициентов.

Пусть T_1, \dots, T_n – цели критериального среза. Допустим, что $p = (p_1, \dots, p_n) > 0$ – вектор «истинных» искомых коэффициентов (неизвестный нам). Тогда оцениваемая матрица отношений имеет вид $S(p) = (s_{ij}(p))_1^n$, где $s_{ij}(p) = p_i / p_j$. Очевидны следующие ее свойства:

$$s_{ii}(p) = p_i / p_i = 1 \text{ (на диагонали стоят единицы);} \quad (1)$$

$$s_{ij}(p) \cdot s_{ji}(p) = (p_i / p_j) \cdot (p_j / p_i) = 1 \text{ (симметричные элементы взаимно обратны);} \quad (2)$$

$$s_{ij}(p) \cdot s_{jk}(p) = (p_i / p_j) \cdot (p_j / p_k) = p_i / p_k = s_{ik}(p). \quad (3)$$

Матрица *состоятельна*, если она обладает первыми двумя свойствами, и *сверхтранзитивна*, если для нее выполнено свойство (3). Легко проверить, что первые два свойства следуют из третьего, всякая сверхтранзитивная матрица состоятельна.

Теперь рассмотрим некоторые варианты формирования матрицы S , помятуя, что ее элемент s_{ij} – это исходная оценка отношения коэффициентов относительной важности целей T_i и T_j на основании экспертной информации.

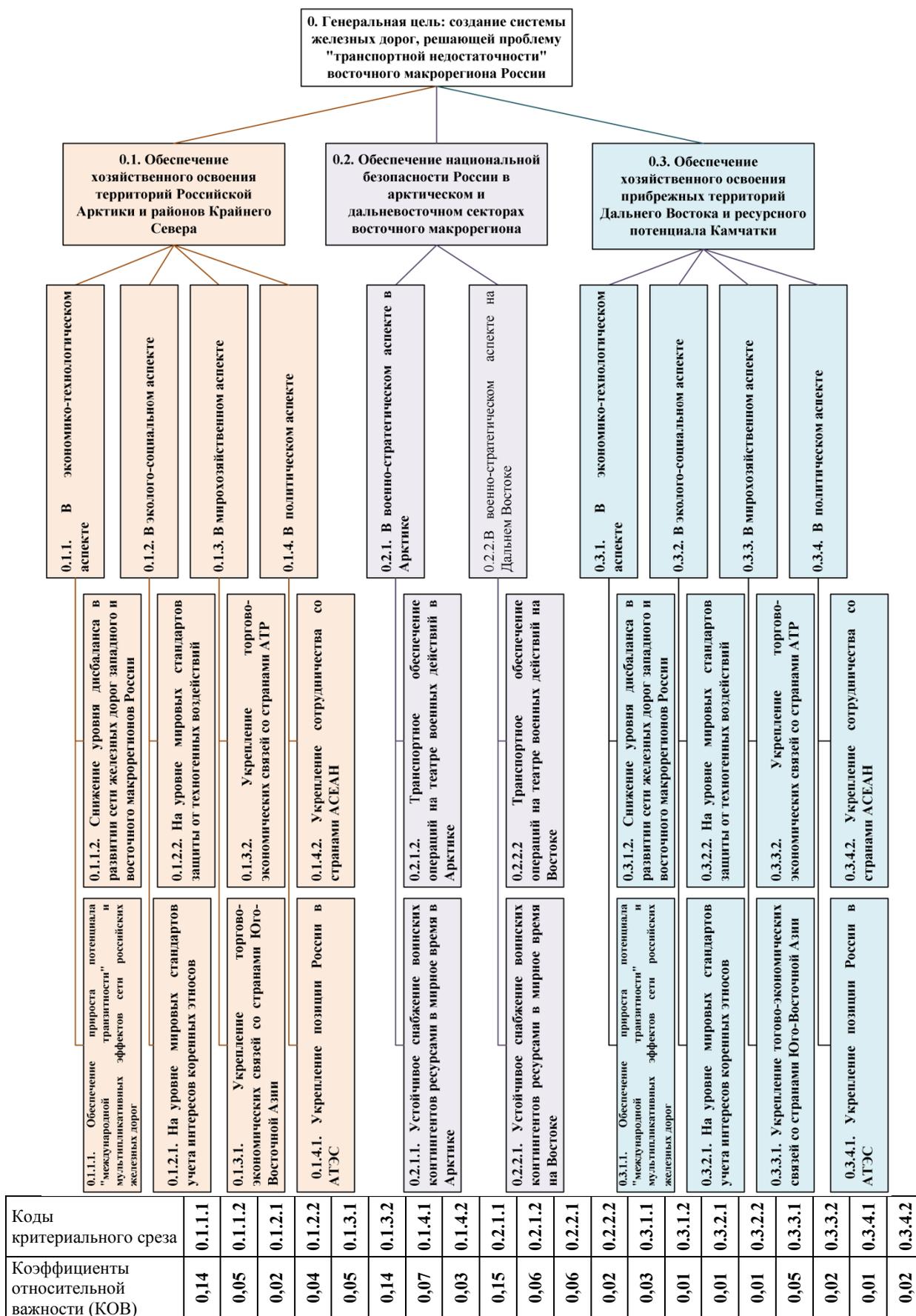


Рис. 3. Система целей КПЖД (после квантификации)

Т.Л. Саати предложил попарно сравнивать цели критериального среза, сопоставляя каждой паре (T_i, T_j) оценку в соответствии с табл. 1.

Понятно, что пара (T_i, T_i) получит оценку 1, и достаточно сравнить $n(n-1)/2$ пар (T_i, T_j) для $i < j$. «Чувствительный» эксперт может использовать промежуточные значения оценок. Если экспертов несколько, то выставленные ими оценки усредняются. Результирующие оценки и образуют матрицу S . Если эксперт один, то матрица S состоятельна, в противном случае состоятельность не гарантирована.

Таблица 1

Шкала относительной значимости

Соотношение значимости целей	Количественная оценка
Равная важность	1
T_i умеренно превосходит T_j	3
T_i сильно превосходит T_j	5
T_j умеренно превосходит T_i	1/3
T_j сильно превосходит T_i	1/5

В ASPER-D использован подход к формированию исходной матрицы S , предложенный А.Б. Хуторецким [15] и устраняющий произвол выбора количественных оценок соотношения значимости целей в методе Т. Саати. В соответствии с этим подходом каждому эксперту предлагают *упорядочить все* сравниваемые цели по неубыванию значимости (вклада в достижение генеральной цели). Упорядочение имеет очевидные достоинства по сравнению с попарными сравнениями: экспертиза проходит быстрее; эксперт лучше выявляет свои предпочтения, обозревая цели в совокупности; гарантирована транзитивность результата экспертизы. Экспертизу, в которой участвуют m экспертов, можно интерпретировать как «турнир» между сравниваемыми целями. В этом турнире сравнение целей T_i и T_j одним экспертом является «партией» между ними: цель, которую эксперт считает более важной, «выигрывает» очко, если же цели равнозначимы по мнению эксперта, то каждая получает половину очка. Таким образом, между любыми двумя целями T_i и T_j происходит «локальный турнир» из m партий; пусть a_{ij} – число очков, присвоенных в этом турнире цели T_i (цель T_i «набрала» a_{ij} очков, играя против T_j). Конечно, любая цель «против себя» получает половину очка в каждой партии, поэтому $a_{ii} = m/2$. Отношение величин a_{ij} и a_{ji} является естественной исходной оценкой относительной значимости целей T_i и T_j .

Заметим, что сформировать матрицу S , полагая $s_{ij} = a_{ij}/a_{ji}$, мы можем, только если все a_{ij} не равны нулю (нет такой пары целей, в отношении которой мнения всех экспертов совпадают). Тем не менее такая ситуация возможна и ее вероятность растёт с ростом квалификации экспертов. Поэтому, если среди a_{ij} есть нули, введем «нейтрального» эксперта, для которого все цели равноценны. Это увеличит все a_{ij} на 0,5 и снимет проблему. Итак, $s_{ij} = a_{ij}/a_{ji}$, если $a_{ij} \neq 0$ для всех i и j , иначе $s_{ij} = (a_{ij} + 0,5)/(a_{ji} + 0,5)$.

Итак, в столбце «КОВ ЕС» табл. 2 (числовая конкретизация матрицы S) указаны полученные с помощью продукта Expert Choice коэффициенты относительной важности подцелей критериального среза дерева целей, изображенного на рис. 3, а в столбце «КОВ AD» – те же коэффициенты, полученные с помощью программного продукта ASPER-D.

Действуя далее по методике Саати (см. рис. 2), т. е. при базовом (определенном) сценарии, получаем следующий результат (рис. 4 и табл. 3).

Начнем со сценариев-контрастов (табл. 4). Подчеркнем, что в методологии системного анализа сценарии не предназначаются для прогнозирования (предсказания) будущего; они дают лишь преимущественно качественное описание возможных состояний неопределенного будущего, если и когда оно меняется радикально. В нашем случае объектом сценирования служит внешняя среда КИП – экономика России в целом, представляемая как многослойная система, где нижним слоем является Восточный регион, о «транспортной недостаточности» которого речь шла выше. Как возможные трансформации модели состояния экономики и общества России в перспективе до 2035 г. были описаны три сценария-контраста (см. табл. 4).

Таблица 2

Оценка эффективности ПМ и ЛКМ по Саати

Критерии	0.1.1.1	0.1.1.2	0.1.2.1	0.1.2.2	0.1.3.1	0.1.3.2	0.1.4.1	0.1.4.2	0.2.1.1	0.2.1.2	0.2.2.1	0.2.2.2	0.3.1.1	0.3.1.2	0.3.2.1	0.3.2.2	0.3.3.1	0.3.3.2	0.3.4.1	0.3.4.2	Ср. геом.	КОВ ЕС*	КОВ АД**
	0,14	0,05	0,02	0,04	0,05	0,14	0,07	0,03	0,15	0,06	0,06	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,05	0,02	0,01	0,02			
0.1.1.1	1	5	7	5	5	1	7	9	1	5	5	7	9	9	9	9	5	7	9	7	6,10	0,12	0,14
0.1.1.2	0,20	1	3	3	1	0,14	0,33	3	0,20	1,00	1,00	3	3	5	5	5	1	3	5	5	2,44	0,05	0,05
0.1.2.1	0,14	0,33	1	0,20	0,14	0,11	0,20	0,20	0,11	0,20	0,20	1	0,33	3	3	3	0,33	1	3	1	0,93	0,02	0,02
0.1.2.2	0,20	0,33	5	1	1,00	0,14	0,33	5	0,14	0,33	0,33	5	5	7	7	7	1,00	5	7	5	3,14	0,06	0,04
0.1.3.1	0,20	1	7	1	1	0,14	1,00	5	0,11	1,00	0,20	7	3	7	7	7	1	7	7	7	3,53	0,07	0,05
0.1.3.2	1,00	7	9	7	7	1	3	9	1	5	5	7	7	9	9	9	5	7	9	7	6,20	0,12	0,14
0.1.4.1	0,14	3	5	3	3	0,33	1	5	0,14	3	3	5	5	5	5	3	5	5	5	5	3,48	0,07	0,07
0.1.4.2	0,11	0,33	5	0,20	0,2	0,11	0,20	1	0,11	0,20	0,20	5	1	7	7	7	0,33	5	7	5	2,60	0,05	0,03
0.2.1.1	1,00	5	9	7	5	1,00	7	9	1	5	5	9	7	9	9	9	5	9	9	9	6,50	0,13	0,15
0.2.1.2	0,20	1	5	3	1	0,20	0,33	5	0,20	1	1	5	5	7	7	7	1	5	7	5	3,35	0,07	0,06
0.2.2.1	0,20	1	5	3	1	0,20	0,33	5	0,20	1,00	1	5	5	7	7	7	1	5	7	5	3,35	0,07	0,06
0.2.2.2	0,14	0,33	1	0,20	0,14	0,14	0,20	0,20	0,11	0,20	0,20	1	0,33	3	3	3	0,33	1	3	1	0,93	0,02	0,02
0.3.1.1	0,11	0,33	3	0,2	0,33	0,14	0,20	1,00	0,14	0,20	0,20	3	1	5	5	5	0,33	3	5	1	1,71	0,03	0,03
0.3.1.2	0,11	0,2	0,33	0,14	0,14	0,11	0,20	0,14	0,11	0,14	0,14	0,33	0,20	1	1	1	0,20	1,00	1	0,33	0,39	0,01	0,01
0.3.2.1	0,11	0,2	0,33	0,14	0,14	0,11	0,20	0,14	0,11	0,14	0,14	0,33	0,20	1,00	1	1	0,20	1,00	1	0,33	0,39	0,01	0,01
0.3.2.2	0,11	0,2	0,33	0,14	0,14	0,11	0,20	0,14	0,11	0,14	0,14	0,33	0,20	1,00	1,00	1	0,20	1,00	1	0,33	0,39	0,01	0,01
0.3.3.1	0,20	1	3	1	1	0,20	0,33	3	0,20	1,00	1,00	3	3	5	5	5	1	3	5	3	2,25	0,05	0,05
0.3.3.2	0,14	0,33	1,00	0,20	0,14	0,14	0,20	0,20	0,11	0,20	0,20	1,00	0,33	1	1	1	0,33	1	3	1	0,63	0,01	0,02
0.3.4.1	0,11	0,2	0,33	0,14	0,14	0,11	0,20	0,14	0,11	0,14	0,14	0,33	0,20	1,00	1,00	1,00	0,20	0,33	1	0,33	0,36	0,01	0,01
0.3.4.2	0,14	0,20	1	0,20	0,14	0,14	0,20	0,20	0,11	0,20	0,20	1,00	1,00	3	3	3	0,33	1,00	3	1	0,95	0,02	0,02
																					49,62	1,00	1,00

* КОВ по Expert Choice;

** КОВ по ASPER-D.

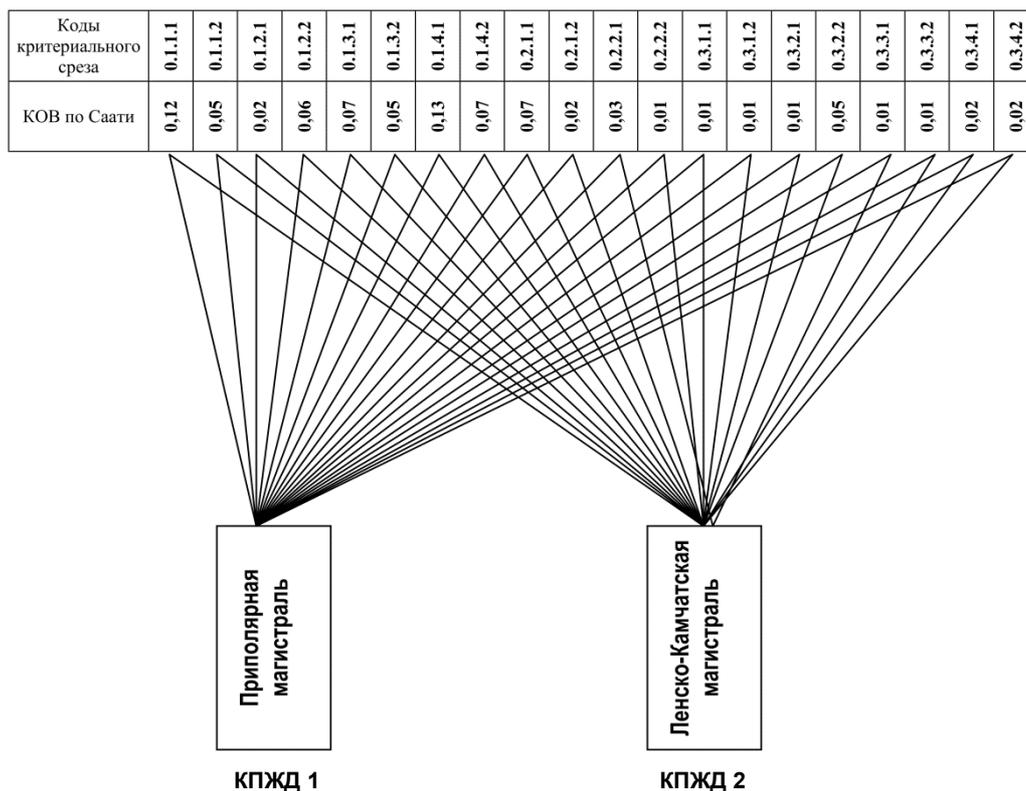


Рис. 4. КОВ критериального среза по Саати и схема оценки при базовом сценарии

Таблица 3

Оценочная матрица по Саати

Альтернатива	Базовый сценарий
ЛКМ	0,176
ПМ	0,824

Сценарии-контрасты

1. Модель экономики и общества России в интервале 2020–2035 гг.		
1.1. Рыночная экономика с сильным государственным регулированием и ориентацией в своем развитии на Восточный вектор	1.2. Экономика при ситуационном государственном регулировании и многовекторной ориентацией в своем развитии	1.3. Рыночная экономика при слабом государственном регулировании и ориентацией в своем развитии на Западный вектор

Примечание. Сценарии в табл. 4 далее именуется как:

- 1.1 – Сценарий I;
- 1.2 – Сценарий II;
- 1.3 – Сценарий III.

Видно, что в рамках принятых предпосылок в оценочной матрице (табл. 5) нет доминирующего КПЖД и, следовательно, имеется неопределенность выбора. Анализ оценочной матрицы по критериям теории принятия решений тем не менее показал, что проект ПМ предпочтительнее по всем (табл. 6) критериям. Однако если принять вероятность актуализации Сценарий II 0,5 и выше, то наиболее предпочтительным оказывается проект ЛКМ.

Таблица 5

Оценочная матрица – ASPER-D

Альтернатива / Сценарий	Сценарий I	Сценарий II	Сценарий III
ЛКМ	0,89	0,29	0,65
ПМ	0,21	0,82	0,45

Таблица 6

Распределение вероятности актуализации сценариев (для критериев Байеса, Ходжа – Лемана, Гермейера)

Сумма	1	2	3
1	0,5	0,3	0,2

Для поверочного расчета с помощью программного продукта GLOBALD были использованы КОВ, полученные выше с помощью программного продукта ASPER. Результирующая табл. 7 выглядит следующим образом.

Таблица 7

Результирующая матрица – GLOBALD

Критерии	Альтернативы	
	1	2
Вальд	*	
Максимакс	*	
Сэвидж	*	
Гурвиц	*	
Байес	*	
Лаплас	*	
Обобщенный Гурвиц (П)	*	
Обобщенный Гурвиц (О)	*	
Ходж – Леман	*	
Гермейер	*	

Выводы

1. Экспериментальные расчеты, результаты которых продемонстрированы в настоящей статье, показали, что использование экспертных технологий при оценке крупномасштабных инвестиционных проектов (типа железнодорожных, рассмотренных выше) в рамках разных компьютерных продуктов, предназначенных для поддержки инвестиционных решений, дают разные оценки общественной эффективности анализируемых альтернатив.

2. Так, сравнение оценок общественной эффективности крупномасштабных железнодорожных проектов Приполярной (ПМ) и Ленско-Кмчатской магистралей (ЛКМ), намечаемых к сооружению в долгосрочной перспективе, показало несовпадение оценок, произведенных с помощью Expert Choice и ASPER-D: в первом случае наиболее предпочтительной оказалась ПМ, во втором также ПМ, но при некоторых конфигурациях исходных предпосылок наиболее предпочтительной оказывается ЛКМ.

3. Различие в оценках объясняется разными подходами в указанных продуктах фактора неопределенности. В Expert Choice он не учитывается, т. е. подход к оценке является детерминистским; в ASPER-D учитывается как вероятностная, так и радикальная неопределенность. И несмотря на некоторую «расплывчатость» оценок ASPER-D, как представляется, продукт более релевантен ситуации слабоструктуризованности проблемы оценки крупномасштабных проектов на предынвестиционной стадии.

4. В целом наш эксперимент подтверждает правильность основных положений системной парадигмы Я. Корнаи и неосистемного подхода к оценке крупномасштабных проектов. А именно: интегративность в новосистемном подходе понимается иначе, чем в прежнем системном подходе, который был междисциплинарным, идущим от частного к общему, в то время как неосистемный подход базируется на представлении исходной целостности объекта оценки, а оценка эффективности подсистем осуществляется по принципу от общего к частному.

5. Наш эксперимент показал, что оба подхода следует использовать как взаимодополняющие при обязательном учете фактора неопределенности. На предынвестиционной стадии крупномасштабных железнодорожных проектов данное положение должно реализоваться в кантианской традиции, т. е. не как гипотетический, но как категорический императив.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-010-00161 А.

Литература

1. Корнаи, Я. Системная парадигма / Я. Корнаи // *Вопросы экономики*. – 2002. – № 4. – С. 4–22.
2. Клейнер, Г.Б. Системная парадигма в экономических исследованиях: новый подход / Г.Б. Клейнер. – <http://kleiner.ru/wp-content/uploads/2014/12/Sistemnaya-paradigma-v-e%60konomicheskikh-issledovaniyah.pdf> (дата обращения: 09.01.2019).
3. Клейнер, Г.Б. Эволюция институциональных систем / Г.Б. Клейнер. – М.: Наука, 2004. – 240 с.
4. Merton, Robert K. *On Sociological Theories of the middle range* / Robert K. Merton // *On Theoretical Sociology. Five Essays. Old and New*. – N.-I: Free Press; L.: Macmillan, 1967.
5. Квейд, Э. Анализ сложных систем / Э. Квейд; пер. с англ. под ред. И.И. Ануреева, И.М. Верещагина. – М.: Советское радио, 1969. – 520 с.
6. Хитч, Чарльз Дж. Военная экономика в ядерный век: пер. с англ. / Чарльз Хитч, Роланд Маккин; под ред. и с предисл. [с. 5–25] канд. экон. наук полк. А.А. Корниенко и канд. ист. наук кап. 1 ранга В.М. Кулакова. – М.: Воениздат, 1964. – 624 с.
7. Шнейдер, Ю.А. Теория множеств и теория систем / Ю.А. Шнейдер // *Системные исследования. Ежегодник 1978*. – С. 70–85.
8. Петраков, Н.Я. Фактор неопределенности и управление экономическими системами / Н.Я. Петраков, В.И. Ротарь; отв. ред. докт. физ.-мат. наук С.А. Айвазян. – М.: Наука, 1985. – 191 с.
9. Saaty T.L. *The analytic hierarchy process*. – N.-Y.: McGraw Hill, 1980. – 288 p. DOI: 10.21236/ADA214804
10. <http://www.gorskiy.ru/Articles/Dmss/AHP.html> (дата обращения: 21. 02. 2019).

11. Подиновский, В.В. О некорректности метода анализа иерархий / В.В. Подиновский, О.В. Подиновская // Проблемы управления. – 2011. – № 1. – С. 8–13.

12. Boyle, H.F. Investment Analysis: US Oil and Gas Producers Score High in University Survey / H.F. Boyle, G.K. Sehenck // Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium, Dallas, 14–15 March, 1985.

13. Saaty, T. Decision making with the analytic hierarchy process / T. Saaty // International journal of services sciences. – 2008. – Vol. 1. – P. 83–98. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590

14. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: пер. с англ. / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.

15. Хуторецкий, А.Б. Экспертное оценивание объектов по неквантифицируемому критерию с помощью модели Бержа – Брука – Буркова: препринт / А.Б. Хуторецкий. – Новосибирск: ИЭ и ОПИ СО РАН, 1994. – 15 с.

Кибалов Евгений Борисович, д-р экон. наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, г. Новосибирск; kibalovE@mail.ru.

Шибикин Дмитрий Дмитриевич, старший преподаватель, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск; wanderer-di.di@ya.ru.

Поступила в редакцию 17 апреля 2019 г.

DOI: 10.14529/ctcr190310

EVALUATION OF LARGE-SCALE RAILWAY PROJECTS: AN UNSYSTEM APPROACH

E.B. Kibalov¹, kibalovE@mail.ru,

D.D. Shibikin², wanderer-di.di@ya.ru

¹ Institute of Economics and Industrial Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation,

² Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation

The problem of assessing the social effectiveness of large-scale railway projects (hereinafter referred to as the CPAW) is considered in this article in the light of J. Kornais system paradigm and its instrumental specification as a non-system approach. In this context, the CPCR is analyzed as large and complex socio-technical systems. The objects of research are the Lensko-Kamchatskaya and Subpolar railway lines, which are at the stage of pre-investment studies in the first case and partially implemented in the second, when the uncertainty of costs and results is extremely high. To assess the comparative effectiveness of these projects, computer products were used – foreign and domestic, designed to work within the framework of the theory of making complex decisions with semi-verbal models and expert information. Computational experiments have shown that different computer products, as a means of supporting investment decision-making procedures, give analysts different recommendations about the preference of compared projects. It is shown that the reason is inadequate accounting for foreign products (as applied to large-scale projects) of the uncertainty factor. The conclusion is made about the productivity of the tools of the neosystemic approach implemented by the authors of the article as an integrator of verbal and mathematical models in evaluating large-scale projects in a situation of uncertainty.

Keywords: large-scale railway project, system paradigm, neo-system approach, computer product, Lensko-Kamchatka highway, Subpolar highway, criteria of the theory of decision making.

References

1. Kornai I. [Systemic Paradigm]. *Questions of Economics*, 2002, no. 4, p. 4–22. (in Russ.)
2. Kleiner G.B. *Sistemnaya paradigma v ekonomicheskikh issledovaniyakh: novyy podkhod* [Systemic Paradigm in Economic Research: a New Approach]. Available at: <http://kleiner.ru/wp-content/uploads/2014/12/Sistemnaya-paradigma-v-e%60konomicheskikh-issledovaniyayah.pdf> (accessed 09.01.2019).
3. Kleiner G.B. *Evolutsiya institutsional'nykh sistem* [The Evolution of Institutional Systems]. Moscow, Science Publ., 2004. 240 p.
4. Merton Robert K. On Sociological Theory of the Middle Range. *On Theoretical Sociology. Five Essays. Old and New*. N.-I., Free Press; L., Macmillan, 1967.
5. Quaid E. *Analiz slozhnykh sistem* [Analysis of Complex Systems]. Moscow, Soviet Radio Publ., 1969. 520 p.
6. Charles Hitch, Roland N. McKean. *Voennaya ekonomika v yadernyy vek* [The Military Economy in the Nuclear Age]. Moscow, Military Publ., 1964. 624 p.
7. Schneider Yu.A. [Set Theory and System Theory]. *System Research. Yearbook 1978*, 1978, pp. 70–85. (in Russ.)
8. Petrakov N.Y., Rotar V.I. *Faktor neopredelennosti i upravlenie ekonomicheskimi sistemami* [Uncertainty Factor and Management of Economic Systems]. Moscow, Science Publ., 1985. 191 p.
9. Saaty T.L. *The Analytic Hierarchy Process*. N.-Y., McGraw Hill, 1980. 288 p. DOI: 10.21236/ADA214804
10. <http://www.gorskiy.ru/Articles/Dmss/AHP.html> (accessed 21.02.2019).
11. Podinovskiy V.V., Podinovskaya O.V. [On the Incorrectness of the Hierarchy Analysis Method]. *Management Problems*, 2011, no. 1, pp. 8–13. (in Russ.)
12. Boyle H.F., Sehenck G.K. Investment Analysis: US Oil and Gas Producers Score High in University Survey. *Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium*, Dallas, 14–15 March, 1985.
13. Saaty T. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*, 2008, vol. 1, pp. 83–98. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590
14. Saaty T. *Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy* [Decision Making. Hierarchy Analysis Method]. Moscow, Radio and Communication Publ., 1993. 320 p.
15. Hutoretsky A.B. *Ekspertnoe otsenivanie ob"ektov po nekvantifitsiruemomu kriteriyu s pomoshch'yu modeli Berzha – Bruka – Burkova* [Expert Assessment of Objects According to an Unquantifiable Criterion Using the Berge-Bruck-Burkov Model]. Preprint. Novosibirsk, IE and OPP SB RAS Publ., 1994. 15 p.

Received 17 April 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Кибалов, Е.Б. Оценка крупномасштабных железнодорожных проектов: неосистемный подход / Е.Б. Кибалов, Д.Д. Шибикин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 104–115. DOI: 10.14529/ctcr190310

FOR CITATION

Kibalov E.B., Shibikin D.D. Evaluation of Large-Scale Railway Projects: an Unsystem Approach. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 104–115. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190310

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И НЕОБХОДИМОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ И КОРПОРАТИВНЫМИ СТРУКТУРАМИ

О.В. Логиновский, А.Л. Шестаков, А.В. Голлай

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Настоящая работа содержит обзор современных информационных технологий, используемых для управления на промышленных предприятиях и в корпорациях, а также в органах государственной власти. Несмотря на достигнутые успехи в области быстродействия компьютеров и суперкомпьютеров, а также систем анализа данных различного рода, внедрение современных информационных технологий не обеспечивает улучшение качества управления различными организационными и корпоративными структурами. Многолетняя практика создания и эксплуатации разнообразных автоматизированных, информационно-вычислительных, аналитических, экспертных и иных систем показала, что внедрение этих систем далеко не всегда способствовало существенному улучшению качества организационного управления и достижению целей повышения эффективности деятельности структур, в которых эти системы были внедрены.

В этой связи сегодня крайне важно осознать, что причины не слишком удачных результатов внедрения различного рода информационных систем кроются не в технических возможностях вычислительных машин, а в том, что методы, модели и технологии управления на всех этапах подготовки и принятия решений остались в сущности теми же, что были еще в последней четверти прошлого века. Отставание в развитии управленческих методов и алгоритмов привело к тому, что возможности вычислительной техники не реализуются в полной мере. Таким образом, важной задачей теории и практики управления является сокращение отставания методов принятия решений от современного уровня вычислительной техники.

В работе ставится задача обеспечения согласования развития вычислительной техники с процессами совершенствования и внедрения управленческих алгоритмов. Приводятся причины, приведшие к такому отставанию, и даются рекомендации по его устранению.

Ключевые слова: информатизация, цифровизация, управление, управление предприятием, методы управления, алгоритмы управления, организационные структуры, умный город, умная промышленность, умное управление, MRP, MRP II, ERP, ERP II, APS, MES, CRM, SCM, OLAP.

Введение

На заре компьютерной эры такие выдающиеся мыслители, как Н. Виннер, К. Эшби, Л. Бертаганфи, С. Бир и др. предложили миру идеи о том, что будущее во многом будет определяться развитием вычислительных способностей машин. Книга Н. Виннера «Кибернетика или управление и связь в животном и машине» стала своего рода знаменем той эпохи. Дальнейшее совершенствование электронных вычислительных машин, а затем появление персональных компьютеров в 1980-х годах во многом способствовали бурному развитию того, что мы называем компьютеризацией, а сегодня уже и цифровизацией.

С позиции сегодняшнего дня, которому свойственна своего рода эйфория от уже достигнутых успехов в области быстродействия компьютеров и суперкомпьютеров, систем анализа данных различного рода, в том числе построенных на технологиях искусственного интеллекта, машинного обучения, обработки больших объемов данных и т. п., кажется, что данный путь способен сам по себе обеспечить улучшение качества управления различными организационными и корпоративными структурами, начиная от органов государственной власти и заканчивая производственными компаниями и иными оргструктурами. Однако многолетняя практика создания и эксплуатации разнообразных автоматизированных, информационно-вычислительных, аналитических, экспертных и иных систем, в основе которых лежат компьютерные технологии, показывает, что далеко не всегда упомянутые системы способствовали существенному улучшению ка-

чества организационного управления и достижению целей повышения эффективности деятельности структур, в которых эти системы были внедрены [1].

Сегодня крайне важно осознать, что причины достижения не слишком удачных результатов внедрения различного рода информационных систем кроются не в технических возможностях вычислительных машин (скорости вычисления и объема обработки данных), а в том, что методы, модели и технологии управления на всех этапах подготовки и принятия решений остались в сущности теми же, что были еще в последней четверти прошлого века.

Отставание в развитии управленческих методов и алгоритмов, независимо от сферы деятельности структур, в которых эти методы применяются, привело к тому, что, несмотря на использование самых современных средств вычислений и обработки данных, результаты управленческой деятельности оказываются далеко не выдающимися. В этом контексте возможности средств вычислительной техники не реализуются в полной мере.

Психология руководителей в понимании того, как управлять возглавляемыми ими структурами, осталась неизменной за многие годы. В результате у глав компаний, руководителей государственных органов и других лиц, принимающих управленческие решения, отсутствует понимание того, как за счет современных информационных систем они смогут повысить эффективность управления. Внедрение имеющихся на рынке информационных систем осуществляется формально. Цели тех, кто продает вычислительную технику и программное обеспечение, а также тех, кто их приобретает, не находятся в русле задач обеспечения высокоэффективного управления деятельностью корпоративных структур самого различного профиля.

Разумеется, что развитие компьютерных технологий и информационных систем сыграло большую позитивную роль в повышении скорости и производительности ведения делопроизводства, получения, хранения и обработки информации, а также создало возможность электронного взаимодействия между подразделениями внутри компаний и с внешними структурами на всех уровнях управления. Несмотря на это, модели, методы и алгоритмы принятия управленческих решений в сущности не изменились или изменились крайне незначительно, во многом сохранив необоснованный субъективизм при их принятии.

Таким образом, необходимость сокращения отставания методов принятия решений от современного уровня вычислительной техники является очень важной, но пока не вполне осознанной задачей. Сегодня совершенно необходимо обеспечить, чтобы развитие вычислительной техники, систем обработки данных и других информационных систем было взаимоувязано с процессами совершенствования и внедрения управленческих алгоритмов как для органов государственной власти, так и для производственных компаний и корпораций, а также с требованиями повышения квалификации руководителей всех уровней в области освоения современных методов подготовки принятия решений.

Для формирования обоснованных предложений по совершенствованию методов, моделей и алгоритмов подготовки принятия управленческих решений необходим анализ развития информационных систем управления, используемых в промышленности, а также в органах государственной власти.

Динамика применения различных информационных систем в промышленных предприятиях и корпорациях

Первым этапом развития информационных систем управления на промышленных предприятиях, построенных на персональных компьютерах, стало внедрение автоматизированных рабочих мест (АРМ) [2], позволившее автоматизировать рутинные операции, связанные с выполнением расчетов [3]. Однако внедрение разнообразных АРМов выявило ряд негативных особенностей. В первую очередь, это отсутствие системности и, как результат, «лоскутная автоматизация», когда каждое подразделение компании создавало собственные АРМы на разных программных платформах. Это привело к большим сложностям при интеграции информационных систем внутри производственных компаний и корпораций. При этом руководству предоставлялись не согласованные между собой данные, полученные в разных подразделениях, на основе которых невозможно подготовить и принять верное управленческое решение. Также АРМы не были ориентированы на автоматизацию других функций, кроме учетных, в результате не обеспечивалась должная автоматизация труда менеджеров предприятия, включая высшее руководство [4, 5].

Следующим этапом развития информационных систем на промышленных предприятиях стало объединение разрозненных АРМов и локальных вычислительных систем в единые автоматизированные системы управления предприятием (АСУ), что позволило перейти от автоматизации отдельных функций к решению задач комплексного планирования и распределения ресурсов на предприятии в соответствии с заключенными договорами поставки и потребностями рынка и др. [6].

Напомним, что в развитии информационных систем промышленных предприятий наиболее известны нижеприведенные классы систем.

– MRP (Material Requirement Planning – планирование материальных потребностей). Система MRP была нацелена на обеспечение предприятия материалами, исходя из производственного плана. Недостатком системы MRP является отсутствие возможности подстроиться под частые изменения размеров заказов и сроков выполнения. По сути работа таких систем сводилась к формированию плана и его отслеживанию.

– В конце 1980-х годов система MRP была дополнена функциями контроля количества произведенной продукции, задержек заказов, объемов и динамики заказов и т. д. Вышеуказанные дополнения позволили реализовать обратную связь в системе, обеспечивающую гибкое планирование с учетом изменения внешних факторов, таких как уровень спроса, состояние дел у поставщика и т. п. (Closed Loop MRP). Однако концепция MRP не позволяла осуществлять планирование ресурсов кроме производственных и не поддерживала возможность планирования территориально-распределенных бизнес-процессов. Сформированный таким образом календарный план часто был нереальным, так как планирование осуществлялось из предположения, что количество ресурсов неограниченно.

– Для устранения недостатков системы MRP был предложен новый стандарт, который получил название MRP II (Manufacturing Resource Planning – планирование производственных ресурсов). Несмотря на схожесть названий, стандарты MRP и MRP II существенно отличаются [7, 8]. Система MRP II реализует планирование всех ресурсов, необходимых для производства, а также финансовое планирование. Для этого она была дополнена такими модулями, как CRP (планирование мощностей), DRP (планирование распределенных ресурсов). MRP и MRP II по своей сути стали не стандартными компьютерными программами, а фактически методологиями управления предприятиями.

– Следующим шагом в эволюции информационных систем стало появление системы ERP (Enterprise Resource Planning – планирование ресурсов предприятия) [9, 10]. ERP-приложения – это мощные продукты, которые включают помимо функций MRP II такие модули, как: автоматизация бухгалтерского учета, маркетинга, финансовых операций, управления цепочками поставок, сбыта продукции и т. д. Тем не менее системы ERP, как и ранее системы MRP, хорошо справляются с функцией планирования, но не рассчитаны на постоянное перепланирование и быстрый учет изменений в окружающей предприятии среде. Обозначенный недостаток все более проявляется при возрастающей конкуренции, когда решающим фактором для выбора поставщика продукции оказывается соблюдение сроков и точности выполнения заказов. Вторым недостатком ERP-систем является отсутствие модулей аналитической обработки данных и моделирования процессов в реальном времени, т. е. средств поддержки принятия решений. Все эти недостатки усугубляются тем фактом, что данные сложные комплексы являются закрытыми коммерческими продуктами, что резко ограничивает возможности их расширения и интеграции с другими информационными системами.

– Необходимость устранения недостатков вышеперечисленных систем привела к созданию ряда иных информационных систем, которые предоставляет рынок в настоящее время:

- ERP II – к ERP добавлена возможность использования мобильных приложений [11];
- APS (Advanced Planning and Scheduling Systems) – улучшенный алгоритм планирования по сравнению с MRP [12, 13];
- MES (Manufacturing Execution Systems) – автоматизированные системы управления производством (АСУТП) [14];
- CRM (Customer Relationship) – системы управления взаимоотношениями с клиентами [15];
- SCM (Supply Chain Management) – системы управления логистическими цепочками [16];
- OLAP (On-Line Analytical Processing) – аналитическая обработка многомерных данных и т. д. [17].

Наряду с расширением и усложнением информационных систем управления, используемых промышленными предприятиями, параллельно происходил процесс миниатюризации электронных компонентов, приведший к возможности внедрения практически в любые обычные вещи модулей, способных обрабатывать и передавать информацию. Таким образом, стало возможным передать часть задач, связанных с принятием решений, непосредственно таким устройствам и автоматизировать многие процессы. Данные устройства получили название «умные вещи».

Отметим, что в конце XX века широкое распространение получили технологии, использующие возможности сети Интернет. Начиная с 1990 года, к сети стали подключать всевозможные устройства, и уже к 2007 году количество подключенных устройств к сети Интернет превысило количество людей, пользующийся сетью. Это время принято за дату появления «Интернет вещей (IoT)» [18, 19]. В настоящее время множество устройств используют сеть для обмена информацией и принятия решений.

Одним из направлений развития концепции «умных вещей», стало появление «умного оборудования», способного самостоятельно диагностировать неисправности, проводить самонастройку и другие подобные операции. Это дало возможность резко снизить количество аварийных простоев и брака. Во многих случаях при организации работы парка «умного оборудования» ему была передана функция принятия решений по организации работ в зависимости от складывающейся ситуации. С учетом высокого быстродействия машин появилась возможность решать задачи, которые для человека ранее были недоступны. В настоящий момент уже можно встретить «умные фабрики», т. е. предприятия, оснащенные «умным оборудованием», с высокой степенью цифровой автоматизации управления. Данная тенденция породила концепцию компьютеризированного интегрированного производства – CIM (Computer integrated manufacturing) [20, 21,], которая по сравнению с системой ERP стала обладать такими функциями, как автоматизированное проектирование (САПР) и оперативное управление производственными цехами и оборудованием.

Рост значимости повсеместного внедрения информационных технологий в управление промышленными предприятиями подтолкнул многие страны к созданию национальных программ развития промышленности, поддерживающих эти технологии. Так, в Германии в 2012 году была разработана стратегия развития промышленности под названием «Платформа Индустрии 4.0» и государственная программа «Промышленность 4.0» [22]. Аналогичные программы разработали в США в 2014 году – «Advanced manufacturing» [23] и в Китае в 2015 году – «Сделано в Китае-2025» [24], в России в 2014 году создана Национальная технологическая инициатива (НТИ) [25], а в 2017 году принята Программа «Цифровая экономика РФ» [26].

Таким образом, развитие компьютерной техники подвело мир, в лице наиболее продвинутых стран, к задачам обеспечения резкого скачка в управлении технологическими объектами на базе новых информационных технологий.

Динамика применения различных информационных систем в органах государственной власти

Автоматизированные информационные системы уже в течение 25–30 последних лет также находят широкое применение в органах государственной власти. Наиболее распространенными в настоящий момент являются системы электронного документооборота, автоматизированные хранилища данных (регистры), средства цифровой электронной подписи, системы анализа и обработки информации, геоинформационные системы и кадастры, справочно-информационные системы и т. п.

Аналогично системам, применяемым на промышленных предприятиях, информационные системы для органов государственной власти прошли путь от автоматизации отдельных рутинных операций до осознания необходимости интеграции в единые информационные комплексы и системы корпоративного управления в органах государственной власти. В этой связи в 2000-х годах во многих городах мира стали разрабатывать концепции «умных городов» как отражение повсеместного внедрения информационных технологий в практику управления городским хозяйством (технологии энергосбережения, сохранения экологии, системы общего доступа к сети Интернет и т. п.).

В настоящее время активно пропагандируют себя как умные такие города мира, как Сингапур (Республика Сингапур), Лондон (Англия), Нью-Йорк, Сан-Франциско, Чикаго (США), Сеул (Австралия), Берлин (Германия), Токио (Япония), Барселона (Испания), Мельбурн (Австралия) и др.

В России Минстроем принят федеральный проект цифровизации городского хозяйства «Умный город». Целью данного проекта является обеспечение ускоренного внедрения цифровых технологий во всех сферах городского хозяйства для повышения качества жизни в российских городах [27].

Также заслуживает внимания проект Росатома по созданию «умных городов», где проживают работники атомной промышленности. В рамках данного проекта предполагается цифровизация водо-, тепло- и электроснабжения, создание цифровой городской инфраструктуры, обеспечивающей эффективное использование ресурсов и управление всеми системами из единого центра, прозрачный потребительский контроль и вовлеченность жителей во взаимодействие с городскими органами управления [28].

Концепцию «умного города» часто трактуют более широко за счет включения в нее такого понятия, как «умный регион» [29]. Внедрение «умных технологий» в отдельно взятых городах региона часто приводило к неравномерности развития городов, что влекло за собой переток населения и деградацию отдельных районов – так называемое цифровое неравенство [30]. Такие примеры неудачного внедрения в практику последних достижений в области цифровых технологий наглядно демонстрируют, что сами по себе информационные технологии не решают проблемы, ради которых они внедрялись. Они являются лишь инструментом, эффективность которого зависит от лиц, принимающих решение [31].

Анализируя опыт внедрения концепций «умного города» различными городами мира, можно заметить, что российские города повторяют те же самые ошибки. Так, исследования 15 ведущих городов мира, проведенные центром управления компании McKinsey, показали, что часто, несмотря на внедрение самых современных интеллектуальных технологий, строительство крупных центров обработки данных, повсеместное использование умных датчиков и т. п. – эти нововведения не находили отклика у горожан и не оказывали заметного влияния на их повседневную жизнь [32]. При этом по мере роста объема финансирования, выделяемого на проекты в области информатизации, резко возрастало количество предложений от компаний производителей оборудования и программного обеспечения, а эффективность таких проектов столь же резко снижалась. Понимание этой проблемы привело к радикальному пересмотру концепции «умного города» в сторону всестороннего вовлечения жителей в процессы принятия и выработки решений. При этом на первый план выходят проблемы, волнующие граждан, а уже потом средства автоматизации выступают как инструменты решения этих проблем.

Исследование теории и практики развития информационных систем промышленных предприятий и государственных органов выявило несколько наиболее существенных причин, приводящих к неудачам:

- 1) отсутствие системности при внедрении (не возникает целостности при формировании единой информационной среды);
- 2) надежда на то, что само внедрение информационных систем повысит качество принятия управленческих решений, реализуется далеко не в полной мере;
- 3) развитие методов и технологий подготовки и принятия управленческих решений плохо согласуется с совершенствованием самих информационно-компьютерных систем.

Отдельно в качестве причин неудач внедрения информационных систем в России можно выделить следующие из них:

- 1) осуществляется, как правило, копирование решений, зарекомендовавших себя в других государствах, без учета российской специфики;
- 2) произошло разрушение отечественной школы автоматизации в области управления, приведшее к острому дефициту специалистов и компаний, способных предложить собственные или качественно адаптировать иностранные информационные системы, а уж тем более предложить новые актуальные управленческие технологии как для органов государственной власти, так и для корпоративных структур.

Заключение

Таким образом, дальнейшее повышение качества управления организационными и корпоративными структурами не представляется возможным без выработки единой государственной и региональной политики в рамках реализации проектов по информатизации. Последние 30 лет показали, что путь «слепого» копирования иностранных разработок не только не позволяет вырваться в лидеры, но и просто догнать по уровню развития передовые страны. В настоящий момент требуются собственные разработки новых методов принятия управленческих решений, базирующихся не только на современных достижениях в области инфокоммуникационных технологий, но и на новых концептуальных разработках в сфере корпоративного управления, ориентированных на российскую специфику, что позволит решать важнейшие задачи развития России и ее регионов.

В этом контексте следует отметить также необходимость повышения требований к образованию и квалификации руководителей всех уровней, а также создания уникальной инновационной среды, состоящей из бизнеса, университетов, научных центров и институциональных условий, обеспечивающих их взаимодействие, т. е. соединение усилий власти, бизнеса и науки.

Литература

1. Коренная, К.А. *Интегрированные информационные системы промышленных предприятий: моногр.* / К.А. Коренная, О.В. Логиновский, А.А. Максимов; под ред. А. Л. Шестакова. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2012. – 314 с.
2. Баронов, В.В. *Автоматизация управления предприятием* / В.В. Баронов. – М.: ИНФРА, 2013. – 239 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. Логиновский, О.В. *Корпоративное управление* / О.В. Логиновский, А.А. Максимов. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 624 с.
5. Логиновский, О.В. *Управление промышленным предприятием* / О.В. Логиновский, А.А. Максимов. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 576 с.
6. Саак, А.Э. *Информационные технологии управления* / А.Э. Саак, Е.В. Пахомов, В.Н. Тюшняков. – СПб.: Питер, 2013. – 575 с.
7. Гаврилов, Д.А. *Управление производством на базе стандарта MRP II* / Д.А. Гаврилов. – СПб.: Питер, 2005. – 416 с.
8. Toomey, J.W. *MRP II: Planning for Manufacturing Excellence* / J.W. Toomey. – Berlin: Springer Science&Business Media, 2013. – 243 p.
9. Alexis, L. *Enterprise Resource Planning* / L. Alexis. – New Dehli: McGrawHill, 2008. – 370 p.
10. О'Лири, Д. *ERP системы. Современное планирование и управление ресурсами предприятия: пер. с англ.* / Д. О'Лири. – М.: Вершина, 2004. – 272 с.
11. Beatty, R.C. *ERP II: Best practices for successfully implementing an ERP upgrade* / R.C. Beatty, C.D. Williams // *Communications of the ACM*. – 2006 – No. 49 (3). – P. 105–109. DOI: 10.1145/1118178.1118184
12. Мауэргауз, Ю.Е. *«Продвинутое» планирование и расписание (AP&S) в производстве и цепочках поставок* / Ю.Е. Мауэргауз. – М.: Экономика, 2012. – 574 с.
13. Kletti, J. *Manufacturing Execution Systems – MES* / J. Kletti. – Springer, 2007. – 271 p. DOI: 10.1007/978-3-540-49744-8
14. Heiko, M. *Manufacturing Execution Systems (MES): Optimal Design, Planning, and Deployment* / M. Heiko, F. Franz, T. Klaus. – New York: McGraw-Hill Companies, 2009. – 279 p.
15. Kostojohn, S. *CRM Fundamentals* / S. Kostojohn, M. Johnson, B. Paulen. – Apress, 2011. – 244 p. DOI: 10.1007/978-1-4302-3591-0
16. Stadler, H. *Supply Chain Management and Advanced Planning Concepts, Models, Software, and Case Studies* / H. Stadler, C. Kilger. – Berlin: Springer, 2015. – 557 p. DOI: 10.1007/978-3-642-55309-7
17. Thierauf, R.J. *On-line Analytical Processing Systems for Business* / R.J. Thierauf. – Westport: Conn. Quorum, 1997. – 332 p.

18. Зараменских, Е.П. Интернет вещей. Исследования и область применения / Е.П. Зараменских, И.Е. Артемьев. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 200 с.
19. Грингард С. Интернет вещей: Будущее уже здесь: пер. с англ. / С. Грингард. – М.: Альпина паблишер, 2016. – 188 с.
20. Rehg, J.A. Computer Integrated Manufacturing / J.A. Rehg, H.W. Kraebber. – New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004. – 574 p.
21. Alavudeen, A. Computer integrated manufacturing / A. Alavudeen, N. Venkateshwaran. – Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd., 2008. – 440 p.
22. Четвертая промышленная революция. Популярно о главном технологическом тренде XXI века. – [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Четвертая_промышленная_революция_\(Industry_4.0\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Четвертая_промышленная_революция_(Industry_4.0)).
23. Семёнова, Е.А. Новая индустриализация: тенденции и перспективы / Е.А. Семёнова // Проблемы национальной стратегии. – 2015. – № 5 (32). – С. 185–203.
24. Павлов, А. Китай: трансформация из большого в сильного. – <http://chinalogist.ru/book/articles/analitika/kitay-transformaciya-iz-bolshogo-v-silnogo>.
25. Восстание машин. Концепция «Индустрия 4.0» сделает новейшие технологии привычными // Российская газета. – Экономика. – № 7283 (117). – <https://rg.ru/2017/05/31/gleb-nikitin-u-industrii-40-i-reindustrializacii-odni-i-te-zhe-celi.html>.
26. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации». – <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf>.
27. Проект цифровизации городского хозяйства «умный город». – <http://www.minstroyrf.ru/trades/gorodskaya-sreda/proekt-tsifrovizatsii-gorodskogo-khozyaystva-umnyy-gorod>.
28. Артемова, А.И. Концепция «умный город»: сущность и содержание / А.И. Артемова, Р.К. Нурмухаметов // Вестник Тульского филиала Финуниверситета. – 2019. – № 53. – С. 53–61.
29. Концепция построения «умного региона» на территории Свердловской области. – <http://d-russia.ru/wpcontent/uploads/2018/06/smart-region-svrld.pdf>.
30. Эксперты: проект «умный регион» поможет избежать увеличения цифрового неравенства в РФ. – <https://tass.ru/ekonomika/5365267>.
31. Логиновский, О.В. Управление развитием региона / О.В. Логиновский, Н.М. Рязанов. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 560 с.
32. Технологии умных городов: что влияет на выбор горожан? McKinsey Center for Government. Июль 2018. – https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Public_Sector/Our_Insights/Smart_city_solutions_What_drives_citizen_adoption_around_the_globe/smartcitizenbook-rus.ashx.

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

Шестаков Александр Леонидович, д-р техн. наук, профессор, ректор, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; admin@susu.ru.

Голлай Александр Владимирович, канд. хим. наук, доцент кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, gollaiav@susu.ru.

Поступила в редакцию 20 апреля 2019 г.

MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES AND THE NEED TO IMPROVE THE QUALITY OF MANAGEMENT OF ORGANIZATIONAL AND CORPORATE STRUCTURES

O.V. Loginovskiy, loginovskiiiov@susu.ru,

A.L. Shestakov, admin@susu.ru,

A.V. Hollay, gollaiav@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

This paper provides an overview of modern information technologies used for management in industrial enterprises and corporations, as well as in government bodies. Despite the progress achieved in the performance of computers and supercomputers, as well as data analysis systems of various kinds, the introduction of modern information technologies does not improve the quality of management of various organizational and corporate structures. The long-term practice of building and operating various automated, information-computational, analytical, expert and other systems has shown that the introduction of these systems did not always contribute to a significant improvement in the quality of organizational management and to achieving the goals of improving the efficiency of the structures in which these systems were introduced.

In this regard, today it is extremely important to realize that the reasons for the not-too-successful results of introducing various types of information systems lie not in the technical capabilities of computers, but in the fact that methods, models and control technologies at all stages of preparation and decision making remained essentially the same as they were in the last quarter of the last century. The lag in the development of management methods and algorithms has led to the fact that the capabilities of computing technology are not fully realized. Thus, an important task of the theory and practice of management is to reduce the backlog of decision-making methods from the modern level of computing technology.

The paper sets the task of ensuring the coordination of the development of computing technology with the processes of improving and implementing management algorithms. The reasons that led to such a lag are given, and recommendations are given to eliminate it.

Keywords: informatization, digitalization, management, enterprise management, management methods, control algorithms, organizational structures, smart city, smart industry, smart management, MRP, MRP II, ERP, ERP II, APS, MES, CRM, SCM, OLAP.

References

1. Korennaya K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Integrirrovannyye informatsionnyye sistemy promyshlennykh predpriyatiy: monografiya pod red. A. L. Shestakova* [Integrated Information Systems of Industrial Enterprises]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2012. 314 p.
2. Baronov V.V. *Avtomatizatsiya upravleniya predpriyatiyem* [Automation of Enterprise Management]. Moscow, INFRA Publ., 2013. 239 p.
3. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N., Burkova I.V., Gelrud YA.D., Korennaya K.A., Shestakov A.L. *Upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekha-nizmy, sistemy: monografiya* [Management of Industrial Enterprises: Strategies, Mechanisms, Systems: Monograph]. Moscow, INFRA-M, 2018. 410 p.
4. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Korporativnoye upravleniye* [Corporate Management]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2007. 624 p.
5. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Upravleniye promyshlennym predpriyatiyem* [Management of an Industrial Enterprise]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2006. 576 p.
6. Saak A.E., Pakhomov Ye.V., Tyushnyakov V.N. *Informatsionnyye tekhnologii upravleniya* [Information Technology Management]. St. Petersburg, Peter Publ., 2013. 575 p.
7. Gavrilov D.A. *Upravleniye proizvodstvom na baze standarta MRP II* [Production Management Based on the Standard MRP II]. St. Petersburg, Peter Publ., 2005. 416 p.

8. Toomey J.W. *MRP II: Planning for Manufacturing Excellence*. Berlin, Springer Science&Business Media, 2013. 243 p.
9. Alexis L. *Enterprise Resource Planning*. New Dehli, McGrawHill, 2008. 370 p.
10. O'Liri D. *ERP sistemy. Sovremennoye planirovaniye i upravleniye resursami predpriyatiya* [ERP Systems. Modern Planning and Enterprise Resource Management]. Moscow, Vershina Publ., 2004. 272 p.
11. Beatty R.C. Williams C.D. ERP II: Best Practices for Successfully Implementing an ERP Upgrade. *Communications of the ACM*, 2006, no. 49 (3), pp. 105–109. DOI: 10.1145/1118178.1118184
12. Mauergauz Yu.Ye. *“Prodvintuoye” planirovaniye i raspisaniye (AP&S) v proizvodstve i tsepkakh postavok* [“Advanced” Planning and Scheduling (AP&S) in Production and Supply Chains]. Moscow, Economics Publ., 2012. 574 p.
13. Kletti J. *Manufacturing Execution Systems – MES*. Springer, 2007. 271 p. DOI: 10.1007/978-3-540-49744-8
14. Heiko M., Franz F., Klaus T. *Manufacturing Execution Systems (MES): Optimal Design, Planning, and Deployment*. New York, McGraw-Hill Companies, 2009. 279 p.
15. Kostojohn S., Johnson M., Paulen B. *CRM Fundamentals*. Apress, 2011. 244 p. DOI: 10.1007/978-1-4302-3591-0
16. Stadler H., Kilger C. *Supply Chain Management and Advanced Planning Concepts, Models, Software, and Case Studies*. Berlin, Springer, 2015. 557 p. DOI: 10.1007/978-3-642-55309-7
17. Thierauf R.J. *On-line Analytical Processing Systems for Business*. Westport, Conn. Quorum, 1997. 332 p.
18. Zaramenskikh Ye.P., Artemyev I.Ye. *Internet veshchey. Issledovaniya i oblast' primeneniya* [Internet of Things. Research and Field of Application]. Moscow, INFRA-M Publ., 2015. 200 p.
19. Gringard S. *Internet veshchey: Budushcheye uzhe zdes* [The Internet of Things: The Future is Here]. Moscow, Alpina Publ., 2016. 188 p.
20. Rehg J.A., Kraebber H.W. *Computer Integrated Manufacturing*. New Jersey, Pearson Prentice Hall, 2004, 574 p.
21. Alavudeen A., Venkateshwaran N. *Computer Integrated Manufacturing*. Delhi, PHI Learning Pvt. Ltd., 2008. 440 p.
22. *Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya. Populyarno o glavnom tekhnologicheskom trende XXI veka* [The Fourth industrial Revolution. Popularly about the Main Technological Trends of XXI Century]. Available at: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Четвертая_промышленная_революция_\(Industry_4.0\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Четвертая_промышленная_революция_(Industry_4.0)).
23. Semonova Ye.A. [New Industrialization: Trends and Prospects]. *Problems of National Strategy*, 2015, no. 5 (32), pp. 185–203. (in Russ.)
24. Pavlov A. *Kitay: transformatsiya iz bol'shogo v sil'nogo* [China: Transformation from Big to Strong]. Available at: <http://chinalogist.ru/book/articles/analitika/kitay-transformatsiya-iz-bolshogo-v-silnogo>.
25. *Vosstaniye mashin. Kontseptsiya “Industriya 4.0” sdelayet noveyshiye tekhnologii pri-vychnyimi* [Rise of the Machines. The Concept of “Industry 4.0” Will Make the Newest Technologies Primitive]. Russian Newspaper. Economy, no. 7283 (117). Available at: <https://rg.ru/2017/05/31/gleb-nikitin-u-industrii-40-i-reindustrializacii-odni-i-te-zhe-celi.html>.
26. *Programma “Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii”* [The Program “Digital Economy of the Russian Federation”]. Available at: – <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf>.
27. *Proyekt tsifrovizatsii gorodskogo khozyaystva “umnyy gorod”* [The Project of Digitalization of Urban Economy “Smart City”]. Available at: <http://www.minstroyrf.ru/trades/gorodskaya-sreda/proekt-tsifrovizatsii-gorodskogo-khozyaystva-umnyy-gorod>.
28. Artemova A.I., Nurmukhametov R.K. [The Concept of “Smart City”: the Essence and Content]. *Bulletin of the Tula branch of the Financial University*, 2019, no. 53, pp. 53–61. (in Russ.)
29. *Kontseptsiya postroyeniya “umnogo regiona” na territorii Sverdlovskoy oblasti* [The Concept of Building a “Smart Region” in the Sverdlovsk Region]. Available at: <http://d-russia.ru/wpcontent/uploads/2018/06/smart-region-svrldl.pdf>.

30. *Eksperty: proyekt "umnyy region" pomozhet izbezhat' uvelicheniya tsifrovogo neravenstva v Rossiyskoy Federatsii* [Experts: the "Smart Region" Project Will Help Avoid Increasing Digital Inequality in the Russian Federation]. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/5365267>.

31. Loginovskiy O.V. Ryazanov N.M. *Upravleniye razvitiyem regiona* [Management of the Development of the Region]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2006. 560 p.

32. *Tekhnologii umnykh gorodov: chto vliyayet na vybor gorozhan?* [Technologies of Smart Cities: What Influences the Choice of Citizens?]. McKinsey Center for Government, July 2018. Available at: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Public Sector/Our Insights/Smart City Solutions What Drives Citizen Adoption around the Globe/smartcitizenbook-rus.ashx>.

Received 20 April 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Логиновский, О.В. Современные информационные технологии и необходимость повышения качества управления организационными и корпоративными структурами / О.В. Логиновский, А.Л. Шестаков, А.В. Голлай // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 116–125. DOI: 10.14529/ctcr190311

FOR CITATION

Loginovskiy O.V., Shestakov A.L., Hollay A.V. Modern Information Technologies and the Need to Improve the Quality of Management of Organizational and Corporate Structures. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 116–125. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190311

СЛУЧАЙНОЕ ПОВЕДЕНИЕ УЧАСТНИКА КАК СПОСОБ МАКСИМИЗАЦИИ ВЕРОЯТНОСТИ ЕГО ВЫИГРЫША В ПАРАДОКСЕ МОНТИ ХОЛЛА

А.В. Копотева

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

Статья посвящена решению парадокса Монти Холла средствами теории принятия решений и имитационного моделирования. Задача представляет собой трехшаговую последовательность действий участника и ведущего. Цель участника – угадать, за какой из трех дверей находится ценный приз. На первом шаге он выбирает одну из трех дверей, на втором шаге ведущий открывает одну дверь без приза, на третьем шаге участник должен определиться, сохранить ли выбор с первого шага или сменить его. Задача имеет почти полувековую историю, и все это время интерес к ней со стороны математиков и психологов не ослабевает. Причина заключается в противоречащем интуитивным соображениям решению и, как следствие, крайней неэффективности человеческого поведения в рассматриваемой ситуации. Традиционно задача рассматривается как вероятностная, реже – игровая. Мы применили альтернативный подход и рассмотрели ее как задачу принятия решения. Для этого были определены варианты поведения участников ситуации и их вероятностные оценки и построено дерево решений задачи. Его концевые вершины определили множество исходов ситуации. Их вероятностная оценка была сформирована в предположении, что участник на третьем шаге сохраняет свой выбор с первого шага с произвольной постоянной вероятностью. Эта вероятность является аргументом общей вероятности выигрыша, построенной на основании формулы полной вероятности события. Максимизация функции вероятности выигрыша позволила определить оптимальное поведение участника, которое состоит в смене выбора. Поскольку здравый смысл подсказывает, что менять выбор бессмысленно, полученный результат был проверен путем имитационного моделирования ситуации при различных вероятностях сохранения участником выбора и подсчета относительных частот выигрышей при сохранении и смене участником своего выбора. Проведенный компьютерный эксперимент полностью подтвердил полученный теоретически результат, что позволило сделать вывод о правильности полученного решения.

Ключевые слова: парадокс Монти Холла, задача принятия решения, теория вероятностей, имитационное моделирование.

Введение

В условиях дефицита ресурсов всех видов люди стремятся принимать рациональные решения (нормативный принцип поведения). Принятие решения основывается на анализе доступной информации и ее корректной интерпретации, однако человеческий мозг устроен таким образом, что делается это путем интуитивных оценок, а не точных расчетов [1]. Поскольку мерой качества возможного решения обычно является здравый смысл, противоречащие ему варианты часто отбрасываются как неэффективные. Если строгое научное обоснование рационального выбора противоречит здравому смыслу, возникает парадокс. Одним из таких парадоксов теории принятия решений является парадокс Монти Холла – задача, привлекая наше внимание при просмотре фильма 2008 года «Двадцать одно» и имеющая почти полувековую историю. Наиболее ранняя ее постановка датируется, по-видимому, 1975 годом и представляет собой статью в американском журнале «American Statistical Association» [2]. В терминах естественного языка задача формулируется следующим образом. Представьте, что Вы – участник игры, в которой необходимо выбрать одну из трех дверей, за одной из которых находится автомобиль, а за двумя другими – козы. Вы выбираете одну из дверей, после чего ведущий (Монти Холл), который знает, где находится автомобиль, открывает одну из оставшихся дверей, за которой находится коза. После этого

Вам (участнику) предлагается решить: открыть выбранную ранее дверь или сменить свой выбор и открыть ранее не выбранную дверь. При этом предполагается, что вероятности нахождения автомобиля за каждой из дверей одинаковы; ведущему известна дверь, за которой находится автомобиль; ведущий обязан открыть дверь, за которой находится коза, отличную от той, которую выбрал участник, и предложить участнику изменить свой выбор; если ведущий может открыть две двери с козами, он выбирает любую из них произвольно, т. е. с равными вероятностями.

С точки зрения здравого смысла нет никакого смысла менять выбор на втором шаге, поскольку вероятность выигрыша составляет $1/2$. Однако математически обоснованным оптимальным вариантом поведения участника является смена выбора, позволяющая повысить вероятность выигрыша с $1/3$ при сохранении выбора до $2/3$. Несмотря на то, что описанный парадокс не имеет непосредственного практического приложения (за исключением азартных игр, в частности, в бридже в форме принципа ограниченного выбора), задача вот уже в течение полувека активно обсуждается специалистами в области математики и психологии по причине полностью противоречащего интуиции решения и существенных трудностей в понимании решения людьми – по данным [3] от 79 до 87 % людей различных национальностей предпочитают сохранять свой изначальный выбор.

В классической постановке [4–8] задача считается вероятностной, а ее решение предполагает оценку вероятности выигрыша автомобиля при сохранении и смене выбора дверей. Кроме того, существуют решения задачи в терминах теории игр и доминирования стратегий [9], сетевых графических моделей [10], в рамках практического эксперимента [11, 12]. Исследователей-психологов интересуют причины затруднений, возникающие у большинства людей при принятии правильного решения в предложенной ситуации [13–16]. Отметим, что большинство исследований англоязычные, качественные отечественные публикации по теме, содержащие формальную математическую постановку и подробное убедительное решение задачи, по крайней мере в открытом доступе, нами не обнаружены. Кроме того, показавшаяся нам естественной постановка парадокса Монти Холла как задачи принятия решения в условиях неполной информации [17, 18], решением которой является обоснованный выбор оптимального поведения участника, в литературе также не найдена, что определяет актуальность и цель данного исследования.

1. Постановка задачи

Для формальной постановки задачи введем следующие обозначения:

– множество вариантов поведения участника на первом шаге

$X_1 = \{x_{11} = (\text{участник выбирает дверь № 1}); x_{12} = (\text{участник выбирает дверь № 2}); x_{13} = (\text{участник выбирает дверь № 3})\};$

– множество вариантов поведения ведущего на втором шаге

$Y_1 = \{y_{21} = (\text{ведущий открывает дверь № 1}); y_{22} = (\text{ведущий открывает дверь № 2}); y_{23} = (\text{ведущий открывает дверь № 3})\};$

– множество вариантов поведения участника на третьем шаге

$X_3 = \{x_{31} = (\text{участник не меняет свой выбор и открывает дверь, выбранную на первом шаге}); x_{32} = (\text{участник изменяет свой выбор и открывает дверь, отличную от выбранной на первом шаге})\}.$

Рациональная последовательность имеющихся в распоряжении участника и ведущего вариантов поведения в предположении, что автомобиль находится за второй дверью, позволяет сформировать дерево исходов задачи (рис. 1).

Если автомобиль находится за первой (третьей) дверью, то в дереве меняются местами второе и первое (третье) поддеревья, начиная с корневой вершины, т. е. расположение выигрышной двери меняет не структуру дерева, а его форму, и не влияет на результат решения. Кроме того, очевидно, что поддеревья для случаев, когда участник выбирает любую из дверей с козой, имеют одинаковую структуру.

2. Решение задачи «Парадокс Монти Холла» путем максимизации вероятности выигрыша участника по вероятности сохранения им выбора на третьем шаге

Поскольку по условию задачи вероятности нахождения автомобиля за каждой из дверей одинаковы, то и выбор двери участником на первом шаге также равновероятен, т. е. $p(x_{11}) = p(x_{12}) = p(x_{13}) = 1/3$. Если участник на первом шаге выбрал первую (третью) дверь с козой, то ведущий может открыть лишь третью (первую) дверь, поскольку он должен открыть дверь, за которой находится коза, отличную от той, что выбрал участник, т. е. $p(y_{21}|x_{11}) = p(y_{21}|x_{13}) = 1$. Если же участник на первом шаге выбрал дверь, за которой находится автомобиль, то ведущий с равными вероятностями может открыть любую из дверей (первую или третью), за которыми находятся козы, т. е. $p(y_{21}|x_{12}) = p(y_{23}|x_{12}) = 1/2$. Предположим, что на последнем шаге участник реализует смешанную стратегию, и обозначим вероятность сохранения участником своего выбора на третьем шаге $p(x_{31}) = z$, следовательно, вероятность смены участником своего выбора на третьем шаге как вероятность противоположного x_{31} события равна $p(x_{32}) = 1 - z$. Тогда:

– если участник на первом шаге выбрал первую (третью) дверь, то при сохранении своего выбора с вероятностью $p(x_{31}|x_{11} \cdot y_{23}) = p(x_{31}|x_{13} \cdot y_{21}) = z$ он получает козу, а при смене выбора с вероятностью $p(x_{32}|x_{11} \cdot y_{23}) = p(x_{32}|x_{13} \cdot y_{21}) = 1 - z$ – автомобиль;

– если участник на первом шаге выбрал вторую дверь, то при сохранении своего выбора и любой открытой на втором шаге двери он выигрывает автомобиль с вероятностью $p(x_{31}|x_{12} \cdot y_{23}) = p(x_{31}|x_{12} \cdot y_{21}) = z$, а при смене выбора с вероятностью $p(x_{32}|x_{12} \cdot y_{23}) = p(x_{32}|x_{12} \cdot y_{21}) = 1 - z$ – козу.

Оптимальным будем считать тот вариант поведения на третьем шаге, который обеспечивает максимум вероятности выигрыша автомобиля. Анализ дерева исходов позволил установить, что вероятность выиграть автомобиль при условии сохранения участником своего выбора на третьем шаге составляет $P_W|x_{31}(z) = z/3$, а вероятность выиграть автомобиль при условии изменения участником своего выбора на третьем шаге составляет $P_W|x_{32}(z) = 2 \cdot (1-z)/3$. Тогда по формуле полной вероятности совокупная вероятность выигрыша составит $P_W(z) = p(x_{31}) \cdot P_W|x_{31}(z) + p(x_{32}) \cdot P_W|x_{32}(z) = z \cdot z/3 + (1-z) \cdot 2 \cdot (1-z)/3 = z^2 - 4z/3 + 2/3 = (z - 2/3)^2 + 2/9$. Поскольку z – вероятность, т. е. $z \in [0; 1]$, то задача максимизации вероятности выигрыша представляет собой задачу нахождения максимального значения функции $P_W(z)$ на отрезке $z \in [0; 1]$. Функция $P_W(z)$ представляет собой параболу с ветвями, направленными вверх, и минимумом в точке $z = 2/3$. Это означает, что максимум функции достигается на одном из концов рассматриваемого отрезка. Поскольку $P_W(z=0) = 0^2 - 4 \cdot 0/3 + 2/3 = 2/3$, а $P_W(z=1) = 1^2 - 4 \cdot 1/3 + 2/3 = 1/3$, то максимальное значение вероятности выигрыша составляет $P_W^{\max}(z) = 2/3$ и достигается при нулевой вероятности сохранения участником своего выбора на третьем шаге $p^*(x_{31}) = z^* = 0$. Тогда вероятность смены участником своего выбора на третьем шаге, обеспечивающая максимум вероятности выигрыша, равна $p^*(x_{32}) = 1 - z^* = 1 - 0 = 1$. Это означает, что наиболее рациональная стратегия поведения участника – x_{32} = (участник изменяет свой выбор и открывает дверь, отличную от выбранной на первом шаге).

3. Экспериментальное решение задачи «Парадокс Монти Холла»

Полученный результат, вообще говоря, противоречит здравому смыслу, подсказывающему, что на последнем шаге вероятности выиграть и проиграть одинаковы и равны $1/2$, поскольку выбирать приходится из двух дверей, за каждой из которых с одинаковой вероятностью находится автомобиль. Чтобы проверить правильность полученного решения задачи, мы провели численный эксперимент, в котором подсчитали относительную частоту выигрышей и проигрышей участника при различных значениях $p(x_{31}) = z$. Эксперимент был реализован в соответствии со следующим алгоритмом:

1) генерируется первое случайное число A , равное 0, 1 или 2, как остаток от деления случайного целого положительного числа на 3, тогда $A + 1$ – номер двери, за которой находится автомобиль;

2) аналогично генерируется второе случайное число B , равное 0, 1 или 2, тогда $B + 1$ – номер двери, выбранной участником на первом шаге;

3) генерируется третье случайное число C , равномерно распределенное на отрезке $[0; 1]$, если его величина меньше заданного $p(x_{31}) = z$, то считаем, что участник не меняет свой выбор на

третьем шаге, если же C превышает $p(x_{31}) = z$, то считаем, что участник меняет свой выбор на третьем шаге;

4) если участник на первом шаге выбрал дверь, за которой находится автомобиль (т. е. $A = B$), то при $C < z$ (сохранение выбора) он его выигрывает, если же участник выбрал на первом шаге дверь с козой ($A \neq B$), то автомобиль он выиграет при $C > z$ (смена выбора).

Алгоритм реализован средствами пакета Mathcad, нами были определены относительные частоты выигрышей участником автомобиля при различных значениях вероятности сохранения им своего выбора, начиная от нуля и заканчивая единицей с шагом $h = 0,1$ и числом итераций $N = 100\,000$. Для получения наиболее полного описания ситуации были подсчитаны относительные частоты выигрышей участника при сохранении и смене им выбора двери на третьем шаге ($\hat{P}_{W_{x31}}(z)$ и $\hat{P}_{W_{x32}}(z)$ соответственно), а также определена совокупная относительная частота его выигрыша $\hat{P}_W(z) = z \cdot \hat{P}_{W_{x31}}(z) + (1 - z) \cdot \hat{P}_{W_{x32}}(z)$ (рис. 2). Очевидно, что $1/3 = z/3 = P_{W_{x31}}(z = 1) \approx \hat{P}_{W_{x31}}(z = 1) = 0,33$ и $2/3 = 2 \cdot (1 - 0)/3 = P_{W_{x32}}(z = 0) \approx \hat{P}_{W_{x32}}(z = 0) = 0,67$, т. е. точные вероятности выигрышей приблизительно равны соответствующим относительным частотам. Кроме того, максимум совокупной относительной частоты выигрыша, равный $\hat{P}_W^{\max}(z) = \hat{P}_{W_{x32}}(z) = 0,67$, действительно достигается при $z = 0$, т. е. при смене участником двери на третьем шаге. Таким образом, численный эксперимент полностью подтверждает правильность аналитического решения задачи.

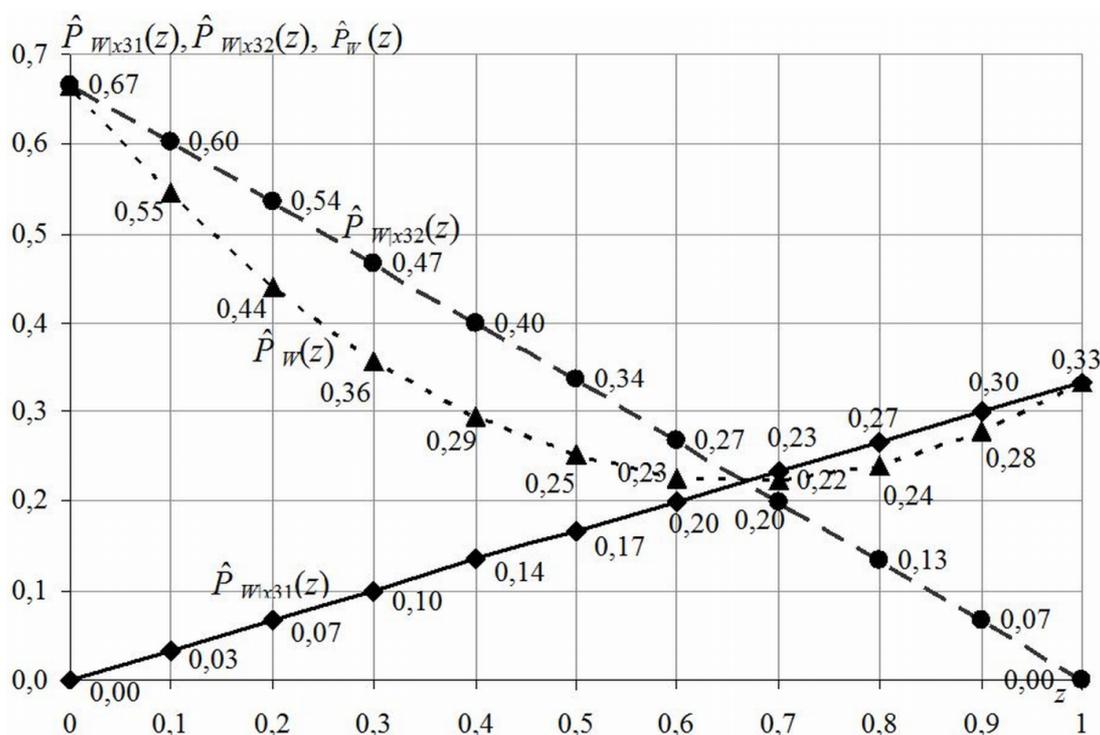


Рис. 2. Относительные частоты выигрыша автомобиля при различных вероятностях сохранения участником выбора на третьем шаге

Заключение

В рамках проведенного нами исследования выполнена формальная математическая постановка парадокса Монти Холла как задачи принятия решения. Задача решена двумя способами — аналитически и экспериментально. Аналитически оптимальный вариант поведения участника определен исходя из максимума вероятности выигрыша автомобиля. Экспериментальное решение найдено путем подсчета относительных частот выигрышей при многократной компьютерной имитации ситуации. Оба варианта решения привели к одинаковым результатам: наиболее рациональным вариантом поведения участника является реализация чистой стратегии $x_{32} =$ (участник

изменяет свой выбор и открывает дверь, отличную от выбранной на первом шаге). Вероятность выигрыша автомобиля в этом случае максимальна и равна $2/3$, тогда как при сохранении выбора двери вероятность выигрыша вдвое меньше и составляет $1/3$. Реализация смешанной стратегии, заключающейся в том, что вариант x_{31} выбирается с вероятностью $z > 0$, а x_{32} – с вероятностью $1 - z < 1$ приводит к снижению вероятности выигрыша $P_W(z) = (z - 2/3)^2 + 2/9$, а значит, нерациональна.

Литература

1. Бернанке, Б. Экономикс. Экспресс-курс: пер. с англ. / Б. Бернанке, Р. Фрэнк. – СПб.: Питер, 2012. – 720 с.
2. Letters to the Editor / St. Selvin, M. Bloxham, A.I. Khuri et. al. // *The American Statistician*. – 1975. – Vol. 29, no. 1. – P. 67–71. – <http://www.jstor.org/stable/2683689> (дата обращения: 10.04.2019). DOI: 10.1080/00031305.1975.10479121
3. Why Humans Fail in Solving the Monty Hall Dilemma: A Systematic Review / L. Saenen, M. Heyvaert, W. van Dooren et. al. // *Psychologica Belgica*. – 2018. – No. 58. – P.128–158. – <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6194549/> (дата обращения: 01.04.2019). DOI: 10.5334/pb.274
4. Тулохонова, И.С. Исследование парадокса Монти Холла / И.С. Тулохонова, М.Д. Цыремпи-лон // Информационные технологии в экономике и управлении. Материалы III Всероссийской научно-практической конференции. Махачкала, 29–30 ноября 2018. – С. 79–82. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=37052250> (дата обращения: 10.04.2019).
5. Воронцов, И.Д. Парадокс Монти Холла / И.Д. Воронцов, А.М. Райцин // Телекоммуникационные и информационные технологии. – 2016. – Т. 3, № 2. – С. 5–7. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=29045698> (дата обращения: 10.04.2019).
6. Lucas, St. The Monty Hall Problem, Reconsidered / St. Lucas, J. Rosenhouse, A. Schepler // *Mathematics Magazine*. – 2009. – No. 82. – P. 332–342. – <https://www.researchgate.net/publication/233565559> (дата обращения: 01.04.2019). DOI: 10.4169/002557009X478355
7. Baratgin, J. Updating our beliefs about inconsistency: The Monty-Hall case / J. Baratgin // *Mathematical Social Sciences*. – Vol. 57, iss. 1. – 2009. – P. 67–95. – <https://www.researchgate.net/publication/222243239> (дата обращения: 01.04.2019). DOI: 10.1016/j.mathsocsci.2008.08.006
8. Gillman, L. The Car and the Goats / L. Gillman // *The American Mathematical Monthly*. – 1992. – Vol. 99, no. 1. – P. 3–7. – <https://www.jstor.org/stable/2324540> (дата обращения: 01.04.2019). DOI: 10.1080/00029890.1992.11995797
9. Gnedin, A. The Monty Hall Problem: Switching is Forced by the Strategic Thinking / A. Gnedin // *Computing Research Repository*. – 2011. – <https://www.researchgate.net/publication/50425504> (дата обращения: 01.04.2019).
10. Gill, R. The Monty Hall Problem is not a Probability Puzzle (It's a challenge in mathematical modelling) / R. Gill // *Statistica Neerlandica*. – 2011 – No. 65. – P. 58–71. – <https://www.researchgate.net/publication/22767444> (дата обращения: 01.04.2019). DOI: 10.1111/j.1467-9574.2010.00474.x
11. Kaivanto, K. Bias Trigger Manipulation and Task-Form Understanding in Monty Hall / K. Kaivanto, E.B. Kroll, M. Zabinski // *Economics Bulletin*. – 2014. – No. 34. – P. 89–98. – www.accessecon.com/Pubs/EB/2014/Volume34/EB-14-V34-II-P10.pdf (дата обращения: 01.04.2019).
12. Stibel, J.M. The Collapsing Choice Theory: Dissociating Choice and Judgment in Decision Making / J.M. Stibel, I.E. Dror, T. Ben-Zeev // *Theory and Decision*. – 2009. – No. 66. – P. 149–179. – <https://link.springer.com/article/10.1007/s11238-007-9094-7> (дата обращения: 01.04.2019). DOI: 10.1007/s11238-007-9094-7
13. Hiraio, T. Brain activities associated with learning of the Monty Hall dilemma task / T. Hiraio, T.I. Murphy, H. Masaki // *Psychophysiology*. – 2017. – No. 54. – P. 1359–1369. – <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28480973> (дата обращения: 01.04.2019). DOI: 10.1111/psyp.12883
14. Herbranson, W.T. Are birds smarter than mathematicians? Pigeons (*Columba livia*) perform optimally on a version of the Monty Hall Dilemma / W.T. Herbranson, J. Schroeder // *Journal of comparative psychology*. – 2010. – No. 124 (1). – P. 1–13. – <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3086893/> (дата обращения: 01.04.2019). DOI: 10.1037/a0017703

15. Mazur, J.E. Choice behavior of pigeons (*Columba livia*), college students, and preschool children (*Homo sapiens*) in the Monty Hall dilemma / J.E. Mazur, P.E. Kahlbaugh // *Journal of comparative psychology*. – 2012. – No. 126. – P. 407–420. – <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3086893/> (дата обращения: 01.04.2019). DOI: 10.1037/a0028273

16. Tubau, E. Reasoning and choice in the Monty Hall Dilemma (MHD): implications for improving Bayesian reasoning / E. Tubau, D. Aguilar-Lleyda, E.D. Johnson // *Frontiers in psychology*. – 2015. – Vol. 6, no. 353. – <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4379739/> (дата обращения: 01.04.2019). DOI: 10.3389/fpsyg.2015.00353

17. Копотева, А.В. Поддержка принятия решения о модернизации производства на промышленном предприятии / А.В. Копотева // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – № 6. – С. 14–25.

18. Копотева, А.В. Математическая модель выбора ресурсосберегающих мероприятий на промышленном предприятии в условиях риска / А.В. Копотева, А.В. Затонский // *Управление финансовыми рисками*. – 2017. – № 1. – С. 60–70.

Копотева Анна Владимировна, канд. техн. наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники, Пермский край; kopoteva_av@mail.ru.

Поступила в редакцию 15 апреля 2019 г.

DOI: 10.14529/ctcr190312

WINNING PROBABILITY MAXIMIZATION USING RANDOM PARTICIPANT BEHAVIOR IN THE MONTY HALL DILEMMA

A.V. Kopoteva, kopoteva_av@mail.ru

Perm National Research Polytechnic University, Berezniki branch, Berezniki, Perm region, Russian Federation

In the issue we consider Monty Hall Dilemma. We use decision making approach and computer simulation to solve it. Monty Hall Dilemma is a three step problem involving a participant, a host and three doors with a valuable prize behind one of them and worthless prizes behind two others. The participant should guess where it is to win the valuable prize. After the participant makes an initial choice for one door, the host opens a non-chosen door with a worthless prize behind it. Then the participant is asked whether he wants to stay with his initial choice, or to switch to the remaining unopened door. The problem is quite old and still of much interest for mathematicians and psychologists because of counterintuitive solution and most humans erroneous situation behavior. Traditionally Monty Hall Dilemma is considered as a probability or a game theory problem. We choose an alternative approach and solve it as a decision making task. We determine possible participant's and host's actions and their probabilities and construct a problem decision tree. Its leaf nodes represent the situation outcomes. Then we evaluate the outcomes probabilities assuming that the participant sticks to his initial choice with a constant unknown probability. It allowed us to construct a total winning probability function. Its maximization allowed us to determine that an optimal participant behavior is to switch. We also performed computer simulation to verify our theoretical solution.

Keywords: Monty Hall dilemma, decision making task, probability theory, simulation.

References

1. Bernanke B., Frenk R. *Ekonomiks. Ekspress-kurs* [Economics. Express-Course]. St. Petersburg, Piter Publ., 2012. 720 p.
2. Selvin St., Bloxham M., Khuri A.I., Moore M., Coleman R., Bryce G.R., Hagans J.A., Chalmers Th. C., Maxwell E.A., Smith G.N. Letters to the Editor. *The American Statistician*, 1975, vol. 29, no. 1, pp. 67–71. Available at: <http://www.jstor.org/stable/2683689> (accessed 10.04.2019). DOI: 10.1080/00031305.1975.10479121
3. Saenen L., Heyvaert M., Van Dooren W., Schaeken W., Onghena P. Why Humans Fail in Solving the Monty Hall Dilemma: A Systematic Review. *Psychologica Belgica*, 2018, no. 58, pp. 128–158. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6194549/> (accessed 01.04.2019). DOI: 10.5334/pb.274
4. Tulokhonova I.S., Tsyrempilon M.D. [The Monty Hall Paradox Research]. *Informatsionnye tekhnologii v ekonomike i upravlenii. Materialy III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Information Technologies in Economy and Management. Materials III of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Makhachkala, 2018, pp. 79–82. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37052250> (accessed 10.04.2019). (in Russ.)
5. Vorontsov I.D., Raytsin A.M. [The Monty Hall Paradox]. *Telecommunication and Information Technologies*, 2016, vol. 3, no. 2, pp. 5–7. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29045698> (accessed 10.04.2019). (in Russ.)
6. Lucas St., Rosenhouse J., Schepler A. The Monty Hall Problem, Reconsidered. *Mathematics Magazine*, 2009, no. 82, pp. 332–342. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/233565559> (accessed 01.04.2019). DOI: 10.4169/002557009X478355
7. Baratgin J. Updating Our Beliefs about Inconsistency: The Monty-Hall Case. *Mathematical Social Sciences*, 2009, vol. 57, iss. 1, pp. 67–95. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/222243239> (accessed 01.04.2019). DOI: 10.1016/j.mathsocsci.2008.08.006
8. Gillman L. The Car and the Goats. *The American Mathematical Monthly*. 1992, vol. 99, no. 1, pp. 3–7. Available at: <https://www.jstor.org/stable/2324540> (accessed 01.04.2019). DOI: 10.1080/00029890.1992.11995797
9. Gnedin A. The Monty Hall Problem: Switching is Forced by the Strategic Thinking. *Computing Research Repository*, 2011. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/50425504> (accessed 01.04.2019).
10. Gill R. The Monty Hall Problem is Not a Probability Puzzle (It's a Challenge in Mathematical Modelling). *Statistica Neerlandica*, 2011, no. 65, pp. 58–71. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/22767444> (accessed 01.04.2019). DOI: 10.1111/j.1467-9574.2010.00474.x
11. Kaivanto K., Kroll E.B., Zabinski M. Bias Trigger Manipulation and Task-Form Understanding in Monty Hall. *Economics Bulletin*, 2014, no. 34, pp. 89–98. Available at: www.accessecon.com/Pubs/EB/2014/Volume34/EB-14-V34-I1-P10.pdf (accessed 01.04.2019).
12. Stibel J.M., Dror I.E., Ben-Zeev T. The Collapsing Choice Theory: Dissociating Choice and Judgment in Decision Making. *Theory and Decision*, 2009, no. 66, pp. 149–179. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11238-007-9094-7> (accessed 01.04.2019). DOI: 10.1007/s11238-007-9094-7
13. Hirao T., Murphy T.I., Masaki H. Brain Activities Associated with Learning of the Monty Hall Dilemma Task. *Psychophysiology*, 2017, no. 54, pp. 1359–1369. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28480973> (accessed 01.04.2019). DOI: 10.1111/psyp.12883
14. Herbranson W.T., Schroeder J. Are Birds Smarter than Mathematicians? Pigeons (*Columba livia*) Perform Optimally on a Version of the Monty Hall Dilemma. *Journal of Comparative Psychology*, 2010, no. 124 (1), pp. 1–13. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3086893/> (accessed 01.04.2019). DOI: 10.1037/a0017703
15. Mazur JE, Kahlbaugh PE. Choice Behavior of Pigeons (*Columba Livia*), College Students, and Preschool Children (*Homo Sapiens*) in the Monty Hall Dilemma. *Journal of Comparative Psychology*, 2012, no. 126, pp. 407–420. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3086893/> (accessed 01.04.2019). DOI: 10.1037/a0028273

16. Tubau E., Aguilar-Lleyda D., Johnson E.D. Reasoning and Choice in the Monty Hall Dilemma (MHD): Implications for Improving Bayesian Reasoning. *Frontiers in Psychology*, 2015, vol. 6, no. 353. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4379739/> (accessed 01.04.2019). DOI: 10.3389/fpsyg.2015.00353

17. Kopoteva A.V. [Decision Making Support in the Task of Industrial Enterprise Manufacture Modernization]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, no. 6, pp. 14–25. (in Russ.)

18. Kopoteva A.V., Zatonskiy A.V. [Mathematical Model of Resource-Saving Projects Selection under Risk Conditions at an Industrial]. *Management of Financial Risks*, 2017, no. 1, pp. 60–70. (in Russ.)

Received 15 April 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Копотева, А.В. Случайное поведение участника как способ максимизации вероятности его выигрыша в парадоксе Монти Холла / А.В. Копотева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 126–134. DOI: 10.14529/ctr190312

FOR CITATION

Kopoteva A.V. Winning Probability Maximization Using Random Participant Behavior in the Monty Hall Dilemma. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 126–134. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctr190312

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИНЫ

С.А. Кряжев, Д.И. Левковский

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), г. Владимир, Россия

Данная работа посвящена вопросам разработки информационной системы поддержки учебно-методических комплексов дисциплины.

Рассматривается вопрос автоматизации и типизации процедуры составления рабочей программы дисциплины для образовательного учреждения. Задача научного исследования состоит в том, чтобы повысить качество составления и уменьшить время, затрачиваемое на составление рабочей программы для учебных заведений, а также повысить удобство актуализации уже созданных рабочих программ.

Объектом исследования является автоматизированная информационная система для автоматизации составления рабочей программы дисциплины. Предмет исследования – методы унификации документов, методы оценки качества РП.

Цель работы – автоматизация процедуры составления рабочей программы на учебные направления для образовательных учреждений и упрощение ее сопровождения и актуализации.

В качестве метода исследования был выбран метод моделирования. Моделирование – это метод создания и исследования моделей. Изучение модели позволяет получить новое знание, новую целостную информацию об объекте.

Первая часть работы посвящена изложению результатов изучения предметной области. В ходе работы был произведен анализ литературы на следующие темы: унификация и оценка качества документов; критерии оценки качества документов; особенности составления рабочей программы дисциплины по ГОСТ. Освещаются основные проблемы, встречающиеся при составлении РП дисциплин.

Вторая часть посвящена проведению выработке методики оценки качества документа рабочей программы, проведен анализ разработанной модели.

Третья часть работы включает разработку основных элементов информационной системы и их описание, а также разработку требований к системе, а также ее непосредственной реализации.

В результате исследования была спроектирована и реализована информационная система, позволяющая автоматизировать процесс создания рабочей программы дисциплины, за счет предоставления частично заполненного шаблона, а также проверку соответствия часов рабочему плану.

Ключевые слова: рабочая программа, автоматизация, учебно-методический комплекс, информационная система, учебный процесс, шаблонизатор.

Введение

В настоящее время составление учебно-методического комплекса происходит вручную. Преподавателям необходимо каждый раз при создании рабочей программы дисциплины составлять шаблон документа, после чего заполнять документ согласно ГОСТам. Затем составленный преподавателем документ должен пройти проверку и согласование с руководством учебного заведения, прежде чем можно будет преподавать по данному плану [1].

Обязательными элементами структуры рабочей программы дисциплины являются [2, 3]:

- 1) титульный лист;
- 2) пояснительная записка (аннотация – включает в себя цели, задачи дисциплины, ее место в учебном процессе, темы смежных дисциплин);
- 3) содержание программы;
- 4) учебно-методическое обеспечение программы;
- 5) тематический план изучения дисциплины;

- 6) перечень вопросов промежуточной аттестации и итогового контроля по дисциплине;
- 7) лист (протокол) утверждения и согласований с другими дисциплинами специальности;
- 8) Лист дополнений и изменений в рабочей программе.

Процесс создания рабочей программы дисциплины занимает большое количество времени и сил как для составления, так и для согласования документа. Кроме того, при заполнении документа вручную существует высокая вероятность неточностей или помарок ввиду человеческого фактора, может быть упущен тот или иной аспект дисциплины, который должен быть обязательно упомянут.

В дополнение к этому периодически происходит обновление федерального государственного образовательного стандарта, что приводит к необходимости обновления рабочих программ дисциплины согласно требованиям [4]. Данная работа рутинна и занимает много времени. Было проведено исследование соответствия рабочих программ учебному плану для высшего учебного заведения «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых». В рамках исследования случайным образом было выбрано 50 рабочих программ дисциплин, принадлежащих различным кафедрам, и выполнялось сравнение содержания с требуемым по учебному плану. Анализировались рабочие программы по направлениям «Магистратура» и «Бакалавриат». Результат анализа приведен на рис. 1.

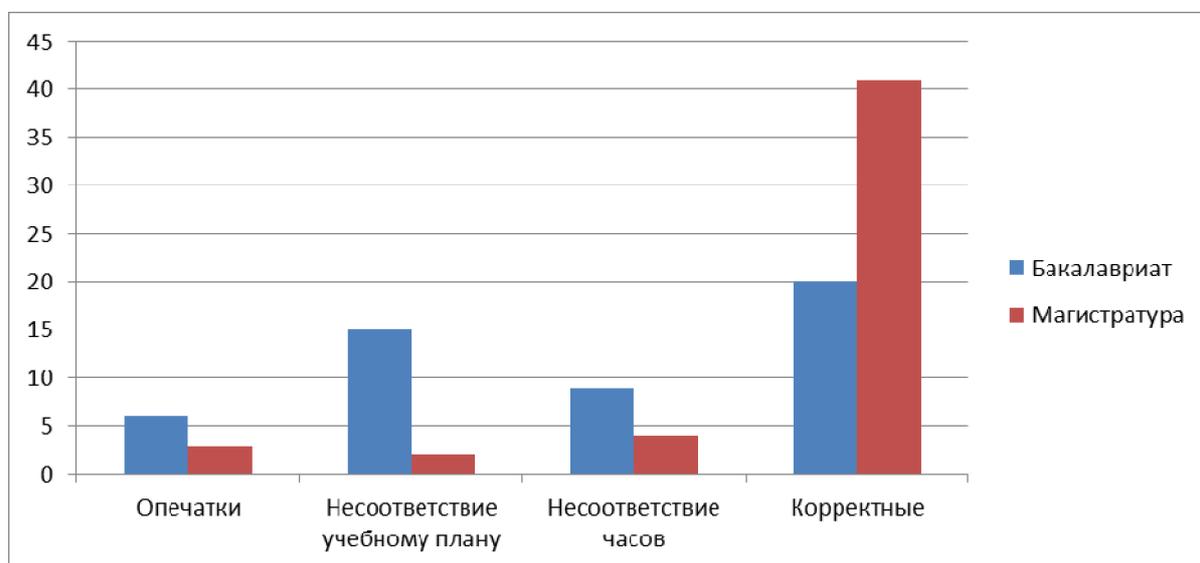


Рис. 1. Анализ корректности данных рабочих программ дисциплин

Из результата исследования видно, что правильность оформления и содержания рабочих программ магистратуры значительно выше рабочих программ бакалавриата, что связано с более частым обновлением учебного плана. Таким образом, автоматизация составления и актуализации рабочей программы дисциплины является актуальной задачей для высших заведений.

1. Разработка модели

Для экспериментального исследования используется метод анализа иерархий (МАИ), который заключается в декомпозиции базовой проблемы на более простые, которые впоследствии подвергаются обработке в виде оценки экспертов по парным сравнениям [5, 6].

Для оценки качества рабочих программ дисциплины для бюджетных учреждений группой экспертов было проведено выделение основных критериев, оказывающих влияние на качество документа. Иерархическая структура показателей качества документов представлена на рис. 2:

- 1) уровень цели – качество документа;
- 2) для первого уровня были выделены следующие критерии:
 - содержание (S_1);
 - соответствие внутренним требованиям (S_2);

- соответствие внешним стандартам (S_3);
 - удобство (S_4);
- 3) второй уровень критериев – обобщенные показатели по каждой группе критериев первого уровня (С).

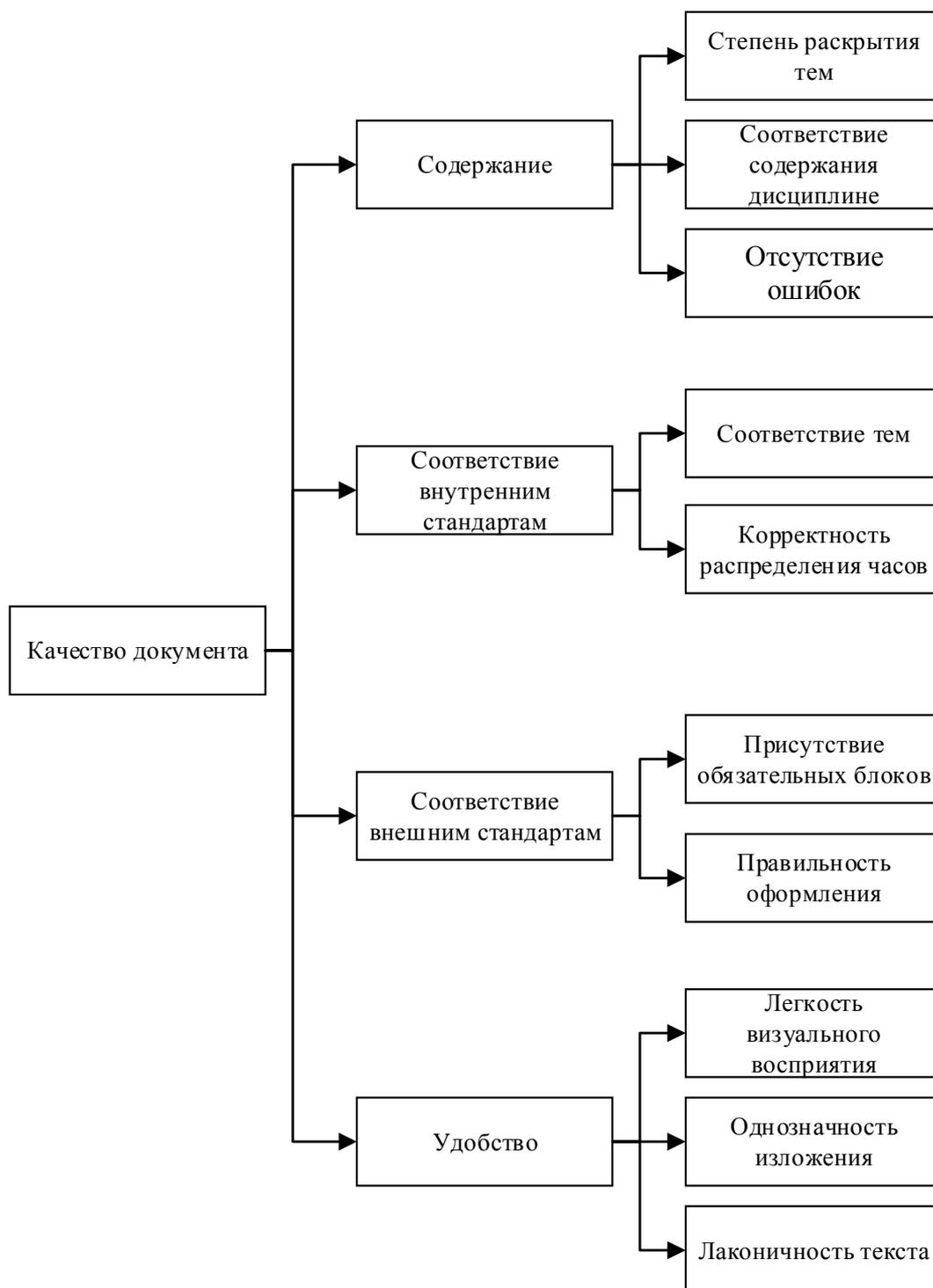


Рис. 2. Иерархическая структура показателей качества документов

После этого, каждый эксперт по своему мнению провел ранжирование выделенных показателей и занес результаты в таблицу (табл. 1).

Ранжирование показателей и обработки результатов

Показатели качества	Ранги у каждого эксперта					Сумма рангов R	Отклонение от средней суммы рангов D_i	Квадрат отклонений D_i^2
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й			
Степень раскрытия тем	10	8	7	7	8	40	12,5	156,25
Соответствие содержания дисциплине	7	5	6	4	5	27	-0,5	0,25
Отсутствие ошибок	5	4	5	6	6	26	-1,5	2,25
Легкость визуального восприятия	8	9	10	10	9	46	18,5	342,25
Однозначность изложения	9	7	8	8	7	39	11,5	132,25
Лаконичность текста	6	10	9	9	10	44	16,5	272,25
Присутствие обязательных блоков	3	2	4	3	1	13	-14,5	210,25
Правильность оформления	4	6	3	5	4	22	-5,5	30,25
Соответствие тем учебному плану	2	3	1	1	2	9	-18,5	342,25
Корректность распределения часов	1	1	2	2	3	9	-18,5	342,25

Для того чтобы определить приоритеты критериев, а также получить оценки для альтернативных решений, в МАИ используется метод парных сравнений, который позволяет построить матрицы парных сравнений.

Метод парных сравнений относится к методу относительных измерений. Основная идея данного метода заключается в том, что элементы x_i попарно сравниваются в отношении вышележащего свойства. В результате сравнения получается матрица парных сравнений, отображающая превосходство элемента x_i над x_j в отношении достижения цели [7].

Результаты сравнения выражаются в фундаментальной шкале (табл. 2). Из табл. 2 видно, что каждый элемент шкалы отображает степень преимущества одного сравниваемого элемента над другим. Важно заметить, что шкала является безразмерной, что позволяет применять данный подход для различных сфер деятельности [8]. При заполнении матриц парных сравнений была использована шкала относительной важности, представленная в табл. 2.

Таблица 2

Шкала относительной важности

Степень превосходства d_{ij}	Интерпретация (объяснение)
1	Равная значимость элементов x_i и x_j
3	Слабое (умеренное) превосходство x_i над x_j
5	Сильное (существенное) превосходство
7	Очень сильное (очевидное) превосходство
9	Абсолютное (максимально возможное) превосходство
2, 4, 6, 8	Промежуточные (компромиссные) уровни
$\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{9}$	Обратные величины (если превосходство элемента x_i над x_j оценивается одним из приведенных выше значений, то превосходство x_j над x_i оценивается обратной по отношению к этому значению величиной)

Матрица парных сравнений для критериев первого уровня представлена в табл. 3.

Таблица 3

Матрица парных сравнений для критериев первого уровня

	S_1	S_2	S_3	S_4	Собственный вектор	Вес критерия W
S_1	1,00	0,33	0,33	5,00	0,86	0,16
S_2	3,00	1,00	1,00	7,00	2,14	0,40
S_3	3,00	1,00	1,00	7,00	2,14	0,40
S_4	0,20	0,14	0,14	1,00	0,25	0,05

Затем было проведено парное сравнение критериев второго уровня, в результате которого была сформирована общая матрица приоритетов критериев второго уровня относительно критериев первого уровня (табл. 4) [9].

Таблица 4

Матрица приоритетов W^{12}

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
S_1	0,23	0,65	0,12	0	0	0	0	0	0	0
S_2	0	0	0	0,75	0,25	0	0	0	0	0
S_3	0	0	0	0	0	0,83	0,17	0	0	0
S_4	0	0	0	0	0	0	0	0,09	0,74	0,17

Для нахождения глобального влияния критерия на модель необходимо воспользоваться следующей формулой [10]:

$$A = W^{01} \cdot W^{12}, \quad (1)$$

где $W^{01} = (0,16; 0,40; 0,40; 0,05)$ в соответствии с табл. 3.

В результате вычислений уравнение модели имеет вид:

$$y = 0,037x_1 + 0,104x_2 + 0,020x_3 + 0,297x_4 + 0,099x_5 + 0,331x_6 + 0,066x_7 + 0,004x_8 + 0,035x_9 + 0,008x_{10}. \quad (2)$$

Исходя из данного уравнения, видно, что наиболее важным параметром для достижения качества документа является x_6 – присутствие обязательных блоков. То есть можно сделать вывод, что, увеличивая показатель присутствия обязательных блоков в документе рабочей программы дисциплины, можно быстрее всего улучшить качество документа.

2. Разработка и проведение эксперимента

Целью эксперимента является выявление критерия, который оказывает самое сильное влияние на качество рабочей программы дисциплины с помощью анализа модели на чувствительность.

Анализ моделей на чувствительность – это процесс, реализуемый после получения оптимального решения. В рамках такого анализа выявляется чувствительность оптимального решения к определенным изменениям исходной модели [11].

Чувствительность можно рассчитать по следующей формуле:

$$A = \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad (3)$$

где Δy – изменение выходной переменной;

Δx – изменение входной переменной.

Для оценки показателей системы введена пятибалльная шкала оценок (табл. 5).

Матрица оценки критериев

Оценка	Описание
5	Отлично. Балл «5» ставится в случае, когда критерий в полном объеме и надлежащем качестве присутствует в рабочей программе дисциплины
4	Хорошо. Балл «4» ставится в случае, когда в рабочей программе дисциплины в полном объеме присутствует данный критерий, однако содержит небольшие ошибки
3	Удовлетворительно. Балл «3» ставится в случае, когда в рабочей программе дисциплины отсутствует либо обязательный параметр данного критерия, либо высоко наличие ошибок при полном объеме содержания
2	Неудовлетворительно. Балл «2» ставится в случае, когда в рабочей программе дисциплины отсутствует более половины содержимого и допущены грубые ошибки
1	Очень плохо. Балл «1» ставится в случае, когда в рабочей программе дисциплины полностью отсутствует данная характеристика

Соответственно, значение модели системы может колебаться от 1 до 5. Для анализа модели на чувствительность группе экспертов были выданы готовые рабочие программы дисциплин с различным показателем критериев качества документов согласно модели, построенной ранее. За изменение показателя критерия возьмем за $\Delta x = 1$. После чего было проведено сравнение итоговых значений результатов качества документа в целом.

Полученные значения отображены в табл. 6.

Таблица 6

Анализ чувствительности

Критерий	Δy	A	Критерий	Δy	A
C_1	0,0091	0,0550	C_6	0,0018	0,0108
C_2	0,0275	0,1650	C_7	0,0005	0,0032
C_3	0,0009	0,0056	C_8	0,0010	0,0060
C_4	0,0006	0,0036	C_9	0,0045	0,0275
C_5	0,0051	0,0308	C_{10}	0,0320	0,1925

Максимальное значение $A_{10} = 0,19$. Таким образом, модель чувствительнее всего к изменению критерия C_{10} – правильность содержания рабочей программы дисциплины. То есть можно сделать вывод, что, увеличивая показатель правильности содержания рабочей программы дисциплины, можно быстрее всего улучшить качество документа.

В результате эксперимента было выявлено среднее значение оценки качества документов, которое составляет $A = 4,82$. На основании этого можно получить следующую оценку качества документа рабочей программы дисциплины: если для анализируемого документа $A \geq 4,8$, то документ полностью соответствует требованиям, если $4,7 \leq A < 4,8$, то документ частично соответствует требованиям, если $A < 4,7$, то рабочая программа дисциплины не соответствует требованиям.

3. Решение задачи

Решением проблемы ручного составления документов является веб-приложение, которое позволяет составлять рабочую программу дисциплины преподавателям образовательных учреждений по необходимым направлениям, в соответствии с выбранными параметрами, а также обеспечить возможность скачивания составленного документа и его просмотра пользователями системы.

Веб-приложение поддерживает создание учебно-методического комплекса согласно современному федеральному государственному образовательному стандарту высшего образования 3++, который вступил в силу с 01.01.2019г.

Пользователь взаимодействует с программной системой через веб-сайт, работая с элементами графического интерфейса. Программная система построена таким образом, что неверное дей-

ствие пользователя не приведет к верному ответу системы. В случае неверного действия пользователь всего лишь получит предупреждающее сообщение, в котором будет информация о том, что он неправильно сделал.

При создании рабочей программы дисциплины пользователь работает с шаблоном, частично заполненным данными из учебного плана дисциплины, на основании которого создается рабочая программа. На рис. 3 представлен алгоритм создания рабочей программы пользователем.

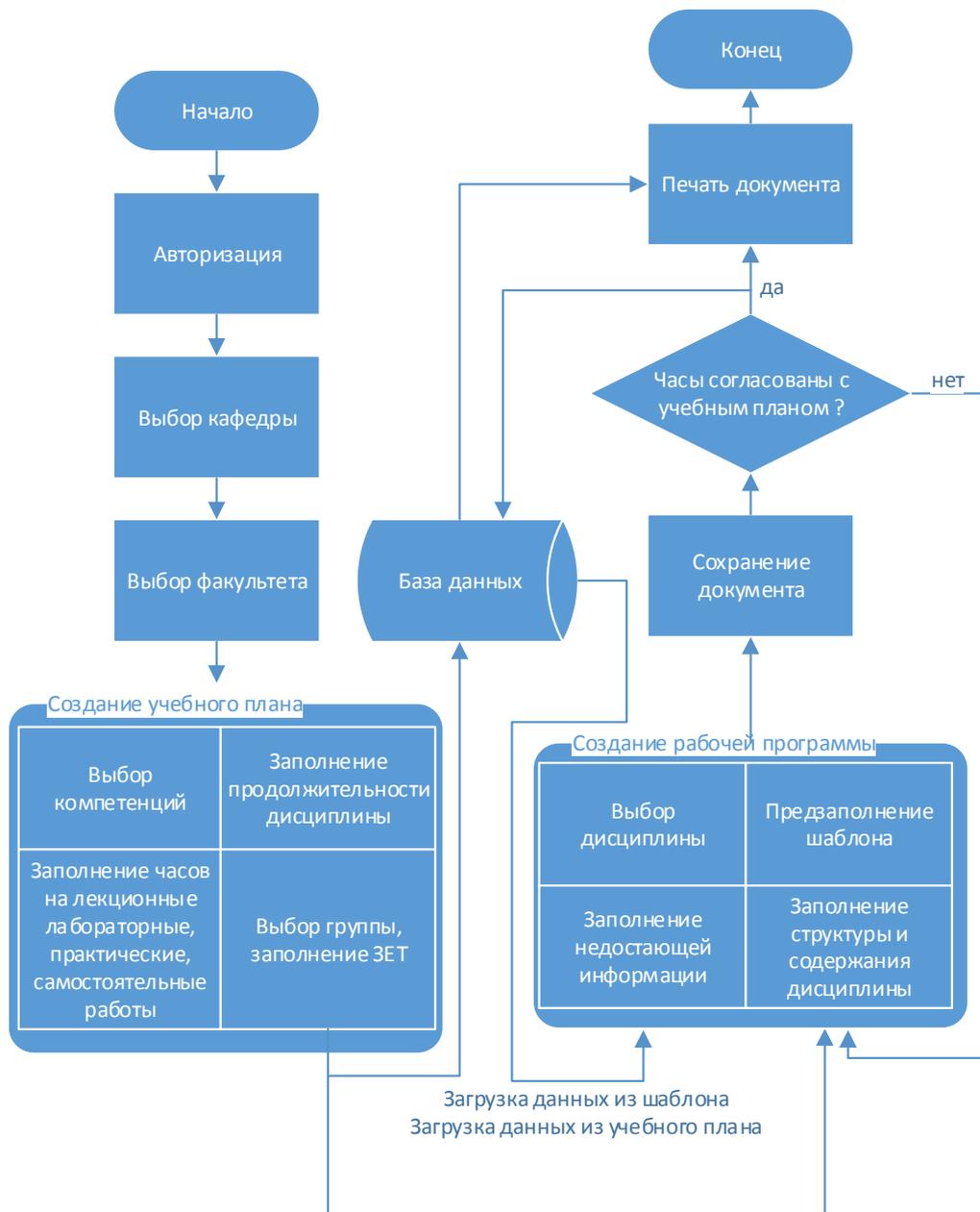


Рис. 3. Алгоритм создания рабочей программы

Веб-приложение реализовано по архитектуре «клиент – сервер» (рис. 4). Среди многоуровневой архитектуры «клиент – сервер» наиболее распространена трехуровневая архитектура, предполагающая наличие следующих компонентов приложения: клиентское приложение, подключенное к серверу приложений, который в свою очередь подключен к серверу базы данных [12].

После сравнения и анализа возможных инструментов для решения задачи для реализации клиентской части приложения было решено использовать язык программирования JavaScript с применением библиотеки jQuery из-за его простоты и скорости работы [13, 14]. Серверная

Управление в социально-экономических системах

часть реализована на языке PHP. В качестве сервера используется сервер Apache. Сервер базы данных – MySQL. Разворачивание веб-приложения происходит на онлайн-хостинге, в качестве которого выступает сторонняя организация.

Для предоставления удобного интерфейса редактирования информации на веб-странице используется CKEditor – WYSIWYG-редактор. Для выгрузки документа в формате PDF используется библиотека Dompdf, способная генерировать PDF из HTML-разметки и CSS-стилей [15]. Демонстрация работы системы приведена на рис. 5.

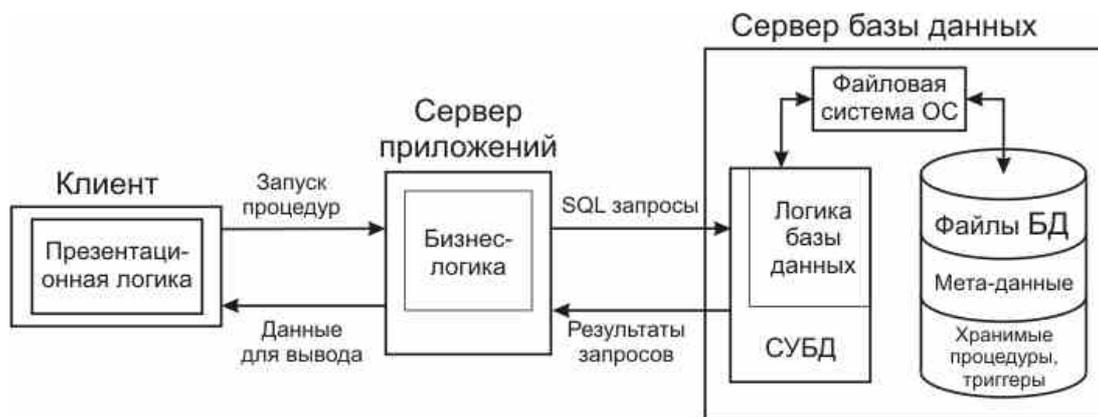


Рис. 4. Схема архитектуры приложения

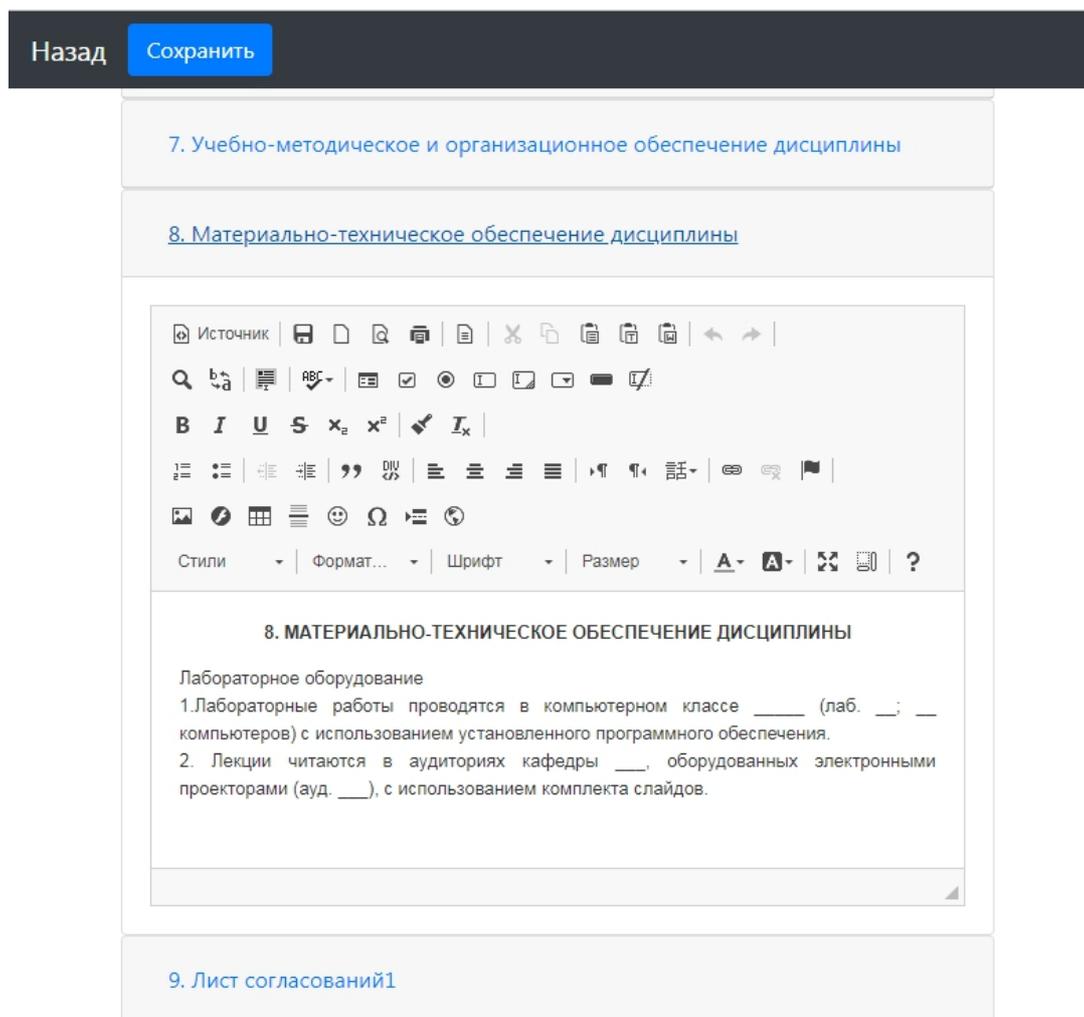


Рис. 5. Предзаполнение раздела УМК согласно шаблону

В приложении присутствует валидация соответствия количества часов в создаваемом УМК в разделе содержания дисциплины и рабочей программе дисциплины, что позволяет контролировать корректность заполнения полей пользователем для исключения ошибок в документе.

В системе существует возможность выгрузки созданного документа в формате PDF на локальное хранилище. Титульный лист примера выгружаемой рабочей программы дисциплины представлен на рис. 6.

Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ)						
«УТВЕРЖДАЮ» Проректор по учебно-методической работе _____ А.А. Панфилов						
«01» 10 2018						
РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ Геоинформационные технологии						
Направление подготовки: 09.03.02 Информационные системы и технологии						
Профиль подготовки: Информационные системы и технологии						
Уровень высшего образования: Бакалавриат						
Форма обучения: очная						
	Трудоёмкость, зач.ед., час	Лекции час.	Практические занятия, час.	Лабораторные работы, час.	СРС, час.	Форма промежуточного контроля
III	3/108	4		8	96	зачёт с оценкой
VI	5/180	36	18	18	72	экзамен
Итого:	8/288	40	18	26	168	
Владимир - 2018						

Рис. 6. Титульный лист выгружаемого документа

В приложении присутствует валидация соответствия количества часов в создаваемой рабочей программы дисциплины в разделе содержания дисциплины и рабочей программе дисциплины, что позволяет контролировать корректность заполнения полей пользователем для исключения ошибок в документе.

В системе существует возможность выгрузки созданного документа в формате PDF на локальное хранилище.

Для работы с приложением пользователю требуется браузер и устойчивое интернет-соединение.

Выводы

В рамках данной работы была рассмотрена информационная система поддержки рабочей программы дисциплины, был выбран метод исследования, построена модель методом анализа иерархий Саати. Был произведен анализ модели на чувствительность оптимального решения и определены критерии, которые сильнее всего влияют на качество рабочей программы дисциплины. Выбранная модель адекватно описывает процесс оценки качества рабочей программы дисциплины для бюджетных учреждений, позволяет определить показатель, с помощью которого можно быстрее всего улучшить качество рабочей программы дисциплины.

Благодаря использованию данного веб-приложения при составлении рабочей программы дисциплины преподавателями образовательных учреждений будет значительно уменьшено количество затрачиваемого времени.

В дальнейшем веб-приложение можно улучшить, добавив необходимый функционал. Конечной целью развития проекта является внедрение в университеты и практическое применение в образовательных учреждениях.

Литература

1. Кушнер, Ю.З. *Методология и методы педагогического исследования: учеб.-метод. пособие* / Ю.З. Кушнер. – Могилев: МГУ им. А.А. Кулешова, 2001. – 66 с.
2. Столярова, А.О. *Учебно-методический комплекс дисциплины: рекомендации по разработке, содержанию, сопровождению: учеб.-метод. пособие* / А.О. Столярова. – Тюмень: ТюмГУ, 2013. – 48 с.
3. *Учебно-методический комплекс: модульная технология разработки: учеб.-метод. пособие* / А.В. Макаров, З.П. Трофимова, В.С. Вязовкин, Ю.Ю. Гафарова. – Минск: РИВШ БГУ, 2001. – 118 с.
4. Аргунова, Т.Г. *Комплексное учебно-методическое обеспечение образовательного процесса: метод. пособие* / Т.Г. Аргунова, И.П. Пастухова; Департамент образования г. Москвы, ГУ Центр качества профессионального образования. – М., 2009. – 109 с.
5. Саати, Т. *Принятие решений. Метод анализа иерархий: пер. с англ.* / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
6. Сажин, Ю.В. *Эконометрика: учеб.* / Ю.В. Сажин, И.А. Иванова; Мордов. гос. ун-т. – Саранск, 2014. – 316 с.
7. Довгун, В.П. *Электронные учебно-методические комплексы по общепрофессиональным дисциплинам* / В.П. Довгун, В.Е. Авраменко. – <http://ou.tsu.ru/seminars/eois2003/tezis/section3.htm> (дата обращения: 01.04.2019).
8. Асеева, Е.Н. *Использование методологии структурного анализа и проектирования SADT/IDEF0 в процессе работы над магистерской диссертацией* / Е.Н. Асеева, Н.А. Положенцева // *Международный журнал экспериментального образования*. – 2011. – № 5. – С. 80.
9. Ковалев, С.М. *Бизнес-процессы, основные стандарты их описания* / С.М. Ковалев, В.М. Ковалев // *Справочник экономиста*. – 2006. – № 11. – https://www.profiz.ru/se/11_2006/businessprocess/.
10. Грунина, Г.С. *Решение многокритериальных задач оптимизации в условиях качественной неопределенности* / Г.С. Грунина, Н.П. Деменков, А.А. Евлампиев // *Вестник МГТУ*. – 1998. – № 1. – С. 45–53.
11. Волокобинский, М.Ю. *Принятие решений на основе метода анализа иерархий* / М.Ю. Волокобинский, О.А. Пекарская, Д.А. Рази // *Финансы: Теория и Практика*. – 2016. – № 2 (92). – С. 33–42.

12. Чугреев, В.Л. Особенности реализации MVC-архитектуры в веб-приложениях / В.Л. Чугреев // Молодой ученый. – 2015. – № 7. – С. 66–71.
13. Крокфорд, Д. JavaScript. Сильные стороны: пер. с англ. / Дуглас Крокфорд. – М.: Питер, 2013. – 176 с.
14. Ленгсторф, Д. PHP и jQuery для профессионалов: пер. с англ. / Джейсон Ленгсторф. – М.: Вильямс, 2010. – 352 с.
15. Spurlock, J. Bootstrap. Responsive Web-Development / Jake Spurlock. – O'Reilly, 2013. – 128 p.

Кряжев Сергей Андреевич, магистрант, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), г. Владимир; ser.ser@mail.ru.

Левковский Дмитрий Иванович, канд. техн. наук, доцент, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), г. Владимир; dumal1c@gmail.com.

Поступила в редакцию 30 апреля 2019 г.

DOI: 10.14529/ctcr190313

INFORMATION SYSTEM FOR THE SUPPORT OF THE WORK PROGRAM OF THE DISCIPLINE

S.A. Kryazhev, ser.ser@mail.ru,
D.I. Levkovsky, dumal1c@gmail.com

*Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VISU),
Vladimir, Russian Federation*

This work is devoted to the development of information systems to support educational and methodological complexes of the discipline.

The question of automating and typing a procedure for drawing up a work program for an educational institution is considered. The task of scientific research is to improve the quality of compilation and reduce the time spent on drawing up a work program for educational institutions, as well as to increase the convenience of updating the already created work programs.

The object of the study is an automated information system to automate the compilation of the work program of the discipline. Subject of research – methods of unification of documents, methods for assessing the quality of the RP.

The purpose of the work is to automate the procedure for drawing up a work program for educational directions for educational institutions and to simplify its maintenance and updating.

As a research method, a modeling method was chosen. Modeling is a method for creating and researching models. The study of the model allows you to get new knowledge, new holistic information about the object.

The first part of the work is devoted to the presentation of the results of the study of the subject area. In the course of the work, an analysis of the literature on the following topics was carried out: unification and assessment of the quality of documents; criteria for assessing the quality of documents; features of drawing up a work program discipline according to GOST. Highlights the main problems encountered in the preparation of the RP disciplines.

The second part is devoted to the development of methods for assessing the quality of the work program document, and an analysis of the developed model has been conducted.

The third part of the work includes the development of the basic elements of an information system and their description, as well as the development of system requirements, as well as its direct implementation.

As a result of the study, an information system was designed and implemented, which allows to automate the process of creating a work program for the discipline by providing a partially completed template, as well as checking the compliance of hours with the work plan.

Keywords: work program, automation, educational and methodical complex, information system, educational process, template engine.

References

1. Kushner Yu.Z. *Metodologiya i metody pedagogicheskogo issledovaniya: uchebno-metodicheskoe posobie* [Methodology and Methods of a Pedagogical Research: Manual]. Mogilev, MSU of A.A. Kuleshov Publ., 2001. 66 p.
2. Stolyarova A.O. *Uchebno-metodicheskij kompleks distsipliny: rekomendatsii po razrabotke, sodержaniyu, soprovozhdeniyu: uchebno-metodicheskoe posobie* [About the Educational and Methodical Complex of Discipline: Recommendations about Development, Maintenance, Support: Manual]. Tyumen', TSU Publ., 2013. 48 p.
3. Makarov A.V., Trofimova Z.P., Vyazovkin V.S., Gafarova Yu.Yu. *Uchebno-metodicheskij kompleks: modul'naya tekhnologiya razrabotki: uchebno-metodicheskoe posobie* [Educational and Methodical Complex: Modular Technology of Development: Manual]. Minsk, RIHS BSU Publ., 2001. 118 p.
4. Argunova T.G., Pastukhova I.P. *Kompleksnoe uchebno-metodicheskoe obespechenie obrazovatel'nogo protsessa : metodicheskoe posobie* [Complex Educational and Methodical Ensuring Educational Process: Manual]. Moscow, Center of Quality of Professional Education, 2009. 109 p.
5. Saati T.L. *Prinyatie resheniy: Metod analiza ierarkhiy* [Decision-Making: Method of the Hierarchies Analysis]. Moscow, Radio and Communication Publ., 1993. 314 p.
6. Sazhin Yu.V., Ivanova I.A. *Ekonometrika: uchebnik* [Econometrics: Textbook]. Saransk, Mordov. State Univ. Publ., 2014. 316 p.
7. Dovgun V.P., Avramenko V.E. *Elektronnye uchebno-metodicheskie komplekсы po obshcheprofessional'nym distsiplinam* [Electronic Educational and Methodical Complexes on All-Professional Disciplines]. Available at: <http://ou.tsu.ru/seminars/eois2003/tezis/section3.htm> (accessed 01.04.2019).
8. Aseeva E.N., Polozhentseva N.A. [Use of Methodology of Structural Analysis and Design of SADT/IDEF0 in the Course of Work on the Master Thesis]. *International Journal of Experimental Education*, 2011, no. 5, p. 80. (in Russ.)
9. Kovalyov S.M., Kovalyov V.M. [Business Processes, Main Standards of their Description]. *Reference Book by the Economist*, 2006, no. 11. Available at: https://www.profiz.ru/se/11_2006/businessprocess/ (in Russ.)
10. Grunina G.S., Demenkov N.P., Evlampiyev A.A. [A Solution of Multicriteria Problems of Optimization in the Conditions of Qualitative Uncertainty]. *Bulletin of MSTU*, 1998, no. 1, pp. 45–53. (in Russ.)
11. Volokobinsky M.Yu., Baking O.A., Strike D.A. [Decision-making on the Basis of a Method of the Hierarchies Analysis]. *Finance: Theory and Practice*, 2016, no. 2 (92), pp. 33–42. (in Russ.)
12. Chugreev V.L. [Features of Implementation of MVC Architecture in Web Applications]. *Young Scientist*, 2015, no. 7, pp. 66–71. (in Russ.)
13. Krokford D. *JavaScript. Sil'nye storony* [JavaScript. Strengths]. Moscow, Piter Publ., 2013. 176 p.
14. Lengstorf, Jason. *Pro PHP and jQuery*, 2010. Berkeley, CA: Apress. DOI: 10.1007/978-1-4302-2848-6
15. Jake Spurlock. *Bootstrap. Responsive Web-Development*. New York, O'Reilly, 2013, 128 p.

Received 30 April 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Кряжев, С.А. Информационная система поддержки рабочей программы дисциплины / С.А. Кряжев, Д.И. Левковский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 135–146. DOI: 10.14529/ctcr190313

FOR CITATION

Kryazhev S.A., Levkovsky D.I. Information System for the Support of the Work Program of the Discipline. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 135–146. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190313

USING OBJECT CONSTRUCTION MODEL FOR IMPLEMENTATION BUILDING WORKS MANAGEMENT

E.V. Gusev, gusevev@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The main idea of the article is the importance of construction project scheduling in the construction management. Construction Execution Plan and Construction Project Schedule (which includes in the first one) are the main source of data for resolving logistical and engineering problems during the construction process. The author is analysed an order of Construction Production Plan in the article. The author highlights that existing methods, which used for preparation schedule of construction project, have some limitations. It is difficult: a) to measure minimum time of overall duration of a project; b) to maximize combination between interrelated works; c) to generate object construction model.

Project technological dependencies model (PTDM) is illustrated in the article. PTDM gives a view on a construction technology an object. There are the main parameters of PTDM:

- 1) quantitative assessments for the technological links between the works;
- 2) temporary range of the work;
- 3) criticality points for each works;
- 4) an overall duration of a project;
- 5) the maximal amount of manpower that can be used in construction an object.

Using PTDM gives the opportunity: a) to determine the minimum construction time an object; b) to maximize combination between interrelated works.

Keywords: project technological dependencies model (PTDM), construction project schedule, construction production plan, construction technology, organizational technological models.

Introduction

There is difference between management in the construction and management on the industrial enterprise [1, 2]. The basis of the management system in the industry is the process management model, whereas in the construction the main point is the control object model. There are different types of this construction organizational technological model (OTM), for instance, a Gantt chart, cyclic graph, or a network schedule.

A Construction Project Schedule (CPS) is among others a part of a Construction Production Plan (CPP), which is certainly one of the most important sections within a Construction Execution Plan (CEP). Moreover, quality CEP is the cornerstone for project's successful delivery, where it even serves as fundamental communication tool for company-wide operations. The CPP can be developed either in-house or externally, however, use of inner capacity suppose better knowledge of abilities and available capacity within organization. After the initial CPS is developed it is over time extended by further and necessary detail when its scheme and information content differs according its intended use. A general contract schedule aims to indicate sequencing for all work packages according previously agreed upon Work Breakdown Structure (WBS). Furthermore, it serves as simple reference tool for overall distribution of major capital constraints in time. On the other hand, a detailed production schedule already contains enhanced detail of information in order to deal with more practical part of production planning. Its objective is enable effective alignment of all tasks in order to secure plan's feasibility and efficiency in terms of resources, technology, and other concerned aspects (e.g. special limitations, site accessibility, etc.).

Determination of a work duration is an important part of the schedule development. This makes it possible to calculate the length of the distribution (break down) of work amounts in time and helps to solve many logistical problems. Therefore, to solve this problem a range of methods has been developed, including the simple methods of labor hours division (labor intensity) by the number of workers taking into account various additional factor, as well as the laborious methods. These laborious methods

include the method of expert evaluations, statistical method, probabilistic method and other methods. However, a variety of different factors that can affect the construction process cannot be taken into account, and constant adjustments are required. And that could influence the logistics (more detailed in the article [3]). The objective of determining the alignment of technologically interrelated works is rather difficult as well.

1. Method for solution the problem

The detailed production schedule overview is standardized in graphical representation as well as information form, when the required information about all concerned tasks is structured as is shown in Table 1.

Table 1

Sample form of Project for implementation of works on an object

Name	Quantity		Amount Labor Requirements	Plant Requirements		Duration, days	Number of shifts	Number of workers in the shift	Composition of the brigade	Schedule
	Units	Amount		Type	Amount					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

The above table should be updated in accordance with the specific object, types of construction, the requirements for the unification of design documentation for a number of purposes, including the usage of automated control system in construction, as well as the including some additional columns (for example, the cost of works). The Construction Project Schedule can be divided into two parts.

The first part (1 to 10) – descriptive part. The second part is the graphical one (column 11). It is necessary to pay attention to the order of development a schedule, which is recommended in professional literature [4–9].

1. Works listing (procedural nomenclature).
2. Determining of the amounts of each type of works.
3. Choosing of the production method for major works and plants.
4. Calculating of the hours of labor and the hours of plants.
5. Determining of the required teams and units.
6. Constructing of technological sequence of works (technological works order).
7. Determining of shift-working arrangements.
8. Determining of the duration of every single work and possible works alignment. Adjusting the units and shifts.

9. Comparison of the estimated construction duration of an object with the standard (directive) construction duration and performing the appropriate adjustments.

The graphical part can be represented as a Gantt chart, cyclic graph, or an network schedule. These graphs are classified as organizational technological models (OTM), which reflect the technological and organizational decisions.

Organizational decisions include items 1, 3, 5, 7, 8 and 9 of to the schedule development order. The item 6 is the only one, which considers some construction technology and the only to the extent that reflects the technological interrelation between the works and their order (sequence).

Let's consider the item 9 in more detail. In order to obtain the estimated construction duration of an object, it is necessary to solve 2 problems:

1. To determine the duration of each work.
2. To determine the alignment of technologically interrelated works.

Let's consider the Fig. 1 as an example.

Fig. 1a shows a graph with the duration of the T_1 . If T_1 does not meet the regulatory, legislative or contractual duration of the construction project, then, in accordance with paragraph 9, it is necessary to make adjustment by changing the number of units and shifts, i.e. to reduce the durations of each work.

In arrow diagrams it is usually performed by reducing the works duration, that are on the critical path. In linier graphs, depending on the deviation, the adjustment are performed for main or secondary processes.

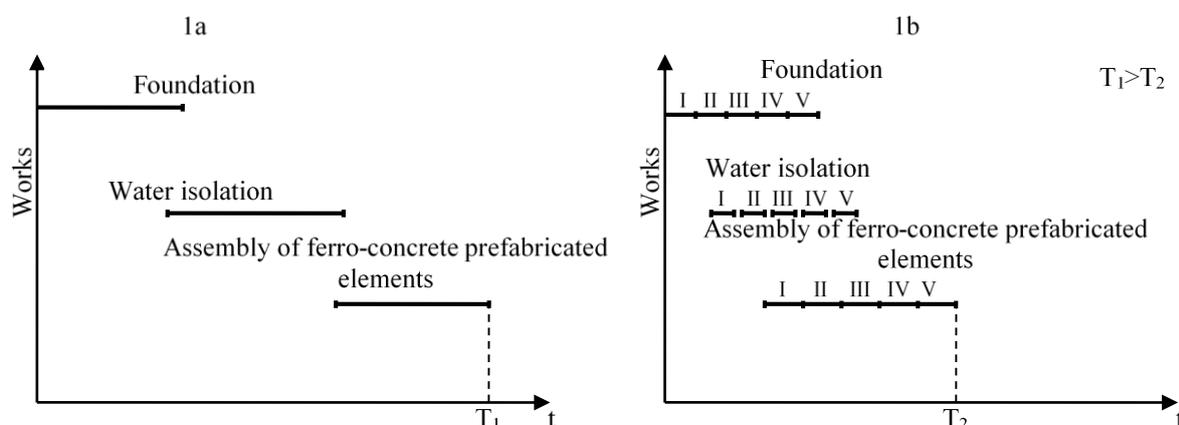


Fig. 1. Examples of combinations of interrelated works

It is more difficult to determine the necessary alignment (or combinations) of technologically interrelated works and to determine the minimum construction time an object. In the process of alignment we should take into account technological restrictions and limitations, different requirements and factors (for example, safety requirements), which determine the maximum possible alignment of technologically interrelated works. In other words, these restrictions, terms and conditions determine the minimum time lag between the start and the end of the preceding work and the start and the end of the following work. Usually, the work alignment is carried out on the basis of the experience, or some statistics, because there are no quantitative estimates of these borders. The most effective work alignment in order to reduce the duration of the construction can be carried out using the methods of the straight-line (sequenced-flow) construction organization, when the works are divided into work zones (catches) or areas (see. Fig. 1b).

If we compare the work duration in the Figures (see. Fig. 1a and 1b), it is clear that the work duration in Fig. 1b is shorter than the work duration in Fig. 1a ($T_2 < T_1$). Dividing into work areas can significantly increase the alignment of works and shorten the construction duration.

However, the practical use of this method of construction organization have revealed serious weaknesses. Firstly, some works can go from continuous (without breaks) production to intermittently production (with breaks), for example the work “Water isolation”. Secondly, work zones very often have different directions. E.g., the brickworks have a horizontal direction, and finishing works – vertical, which makes impossible the alignment of these works. And thirdly it is quite difficult to evaluate a work zone quantitatively.

Based on the mentioned above we can draw the following conclusions:

1. For the determination of minimal construction duration of an object (connected with some adjustments of works duration) the empirical methods are used. These methods cannot ensure the uniqueness (monosomy) of decisions.

2. There are no strictly defined limits of the alignment for the determining of the maximal alignment of technologically interrelated works, as well as there is no the earliest beginning and the end the work in relation to the beginning and the end of the preceding work.

3. To determine the limits of minimization of construction duration and the alignment of technologically interrelated works it is necessary to use a tool, which allows us to have a specific quantitative estimates.

2. Mathematical model of the solution

In construction there are two kinds of technology – technology for execution of certain works (construction operations) and the construction technology (technology for the construction of a facility/object).

Technology for execution of certain works, or more definitely, the technology of construction operations is a functional system, including the resources (time, labor and material), as well as restrictions and rules of interaction to achieve the desired result – the implementation of certain types of work, processes and elements of construction projects (objects). The main documents, which regulates technological rules during construction processes, types of work, the elements of buildings and structures are the Flowchart for the Production of Separate Works [10, 11].

In contrast to technology for execution of certain works (construction operations) the construction technology (technology for the construction of a facility/object) is not so dynamical. Where is not a complete definition of the concept “the construction technology (technology for the construction of a facility/object)” in professional literature contrary to the concept “technology for execution of certain works”. This can be explained by the fact that any changes that occur during the construction project refers to the construction technology, e.g. changes in the technology for execution of a work, changes in work zones (areas) priority, teams movements, intensity of production, as well as the replacement of vehicles, mechanisms, plants etc. All these changes and replacements are not classified. And the studies on the impact of different types of these changes to different productions of the building process are not carried out deeply. At the same time, it is possible to say antecedently that some changes in plans affect only the performance of work (its timing), some of them affect organizational decisions, some affect the technological sequence of works, i.e. the technological interrelationship, and the others affect the planned amounts of work, etc.

Construction technology considers an object (a facility, project) broadly, with its “internal” works interrelationship, which is typical for this type of object. As the rule, the development of this “internal” interrelationship between the works leads us to the setting up of the technological sequence (order) of works of this project. The construction project technology is usually finished on this and the technological sequence is displayed as arrow diagrams, network graphs, technological graphs etc. [12–15].

Such a basic order of technologically related works leads to a significant increase in the construction duration. Therefore, technological sequence reflects only the qualitative aspect of the construction technology with regard to the works coherence.

At the same time the works are connected between each other not according to a sequence i.e. qualitatively, but also quantitatively. Under current methods of organizational and technological planning of construction and assembly operations, quantitative ratio (more common as an alignment) of interrelated works are determined on the basis of the selected intensity, object division on work zones and other spatial areas, shifts etc., which are rather subjective.

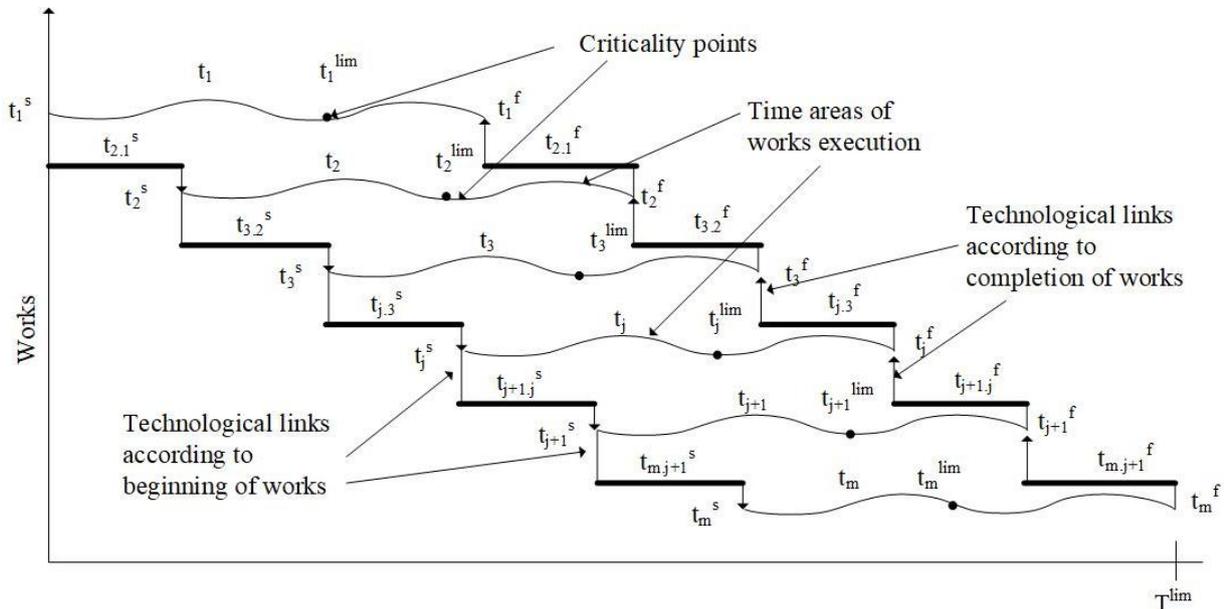
In practice, the quantitative ratios for the beginning and the end of the technologically related works are defined in accordance with production work regulations, with safety rules and other technical requirements. Moreover, the evaluation of these relations is based not on subjective assessments but on the regulations.

The term “construction technology” can be defined as follows: “it is a qualitative and quantitative assessment for the technological links between the works determining the work planning possibility and industrial organization depending on the results of the previous ones”. In this case, the point of the construction technology modelling is to establish technological links between various works and to determine a minimum volume of the previous works that give the possibility to plan a technologically interconnected volume of the following stage.

Such model describing the technological links between works stages and their quantitative assessment in the beginning and after their completion of work is designed and presented in Fig. 2. It is important that there are no organizational decisions when calculating quantitative assessments. This increases the model stability when planning works and construction organization. As technological dependences for the initial and final works determine the technological stages of the project works, we will term it as a project technological dependencies model (PTDM). This model is described in more details in Gusev’s monograph [16].

PTDM calculation is reduced to time assessments for technological dependencies for the initial (not earlier than the initial) and the final (not earlier than the final) works; time area for each stage (as opposed to the duration of the work according to OTM); criticality points of stages. “Not earlier than the initial one” means that follow-up work $j + 1$ cannot start technologically if functional minimum volume

of work $V_{\min j+1}^s$ is not done on the preceding j ; “not earlier than the final one” means that follow-up work $j + 1$ technologically may not end earlier if the minimum volume of work $V_{\min j+1}^f$ technologically essential after the previous work j is not be done.



T^{lim} – directory (normative, contractual) duration of the objection struction; t_j – duration of time area; t_j^s ; t_j^f – technologically possible beginning and completion of work; t_{j+1}^s ; t_{j+1}^f – minimum technological delays during the beginning and completion of the following work $j+1$ from the point of the beginning and completion of the previous work j ; t_j^{lim} – criticality point after which execution of the volume of work demands maximum intensity and can lead to disruption of work T^{lim}

Fig. 2. Graphic presentation of the project technological dependencies model

The presented model helps us to determine the minimal duration of construction which is technologically possible. This process is quite simple. If we decrease the duration (shift point T_{nor} to the left) together with the technological dependences of the end of the works, the temporary areas (time domains) of work are reduced. The newly obtained duration time domains of each work must be checked by means of the formula:

$$R_{j,i}^h = \frac{V_{i,j} \cdot w_j}{t_{i,j} \cdot \pi^n} \leq R_{j,i \max}^h,$$

where $R_{j,i \max}^h$ – the maximal amount of manpower of a specialty h , which can be directed to perform the work j on the project i , using the whole temporary area; $R_{j,i}^h$ – the calculated amount of manpower of a specialty h , which is necessary for the performing the work j on the project i , using the whole temporary area; $V_{i,j}$ – the amount of work j on the project i ; w_j – time allowance for performing per amount unit of work j ; π – rate of labor productivity increase.

If given ratio corresponds to this $R_{j,i}^h = R_{j,i \max}^h$, the minimal duration is reached.

PTDM helps us to perform the maximum possible alignment of technologically interrelated works. The essence the method of the project graph calculating is that we bind the time limits of the beginning and the end of follow-up work with respect to the preceding work within the time-domain, which is known from the relevant PTDM.

Calculating of the project graph we use not only the time-domain, but also such parameters of technological model, as a possible beginning of work t_j^s , possible end of work t_j^f , minimal initial and final gaps, the project construction duration etc.

Let's consider the example of binding, which is shown in Fig. 3 (parameters $t_j^{s.w}$; $t_j^{f.w}$ are the estimated start and end dates of works).

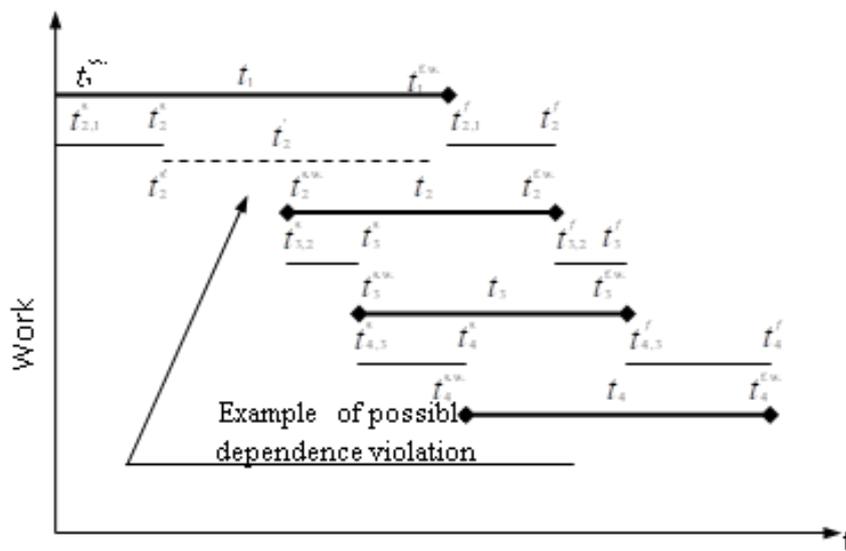


Fig. 3. Example of graphical representation for work dependencies based on MTSD with displayed boundaries for possible maximal work alignment in time

The work t_2 cannot be started before the point t_2^s and cannot be ended before the point t_2^f . If the beginning of work t_2 is aligned with the point t_2^s ($t_2^{s.w} = t_2^s$), its end will not be before the point t_2^f ($t_2^{f.w} < t_2^f$) and this will cause the violation of technological dependence (work t_2 shown by the dotted line). That's why the end of the work t_2 should be aligned with the point t_2^f ($t_2^{f.w} = t_2^f$).

The beginning of a work is defined by:

$$t_2^{s.w} = t_2^{f.w} - t_2.$$

The beginning $t_3^{s.w}$ of work t_3 is equal to t_3^s , and the end is

$$t_3^{f.w} = t_3^{s.w} + t_3;$$

$$t_3^{f.w} > t_3^f.$$

In general, the parameters of the beginning $t_j^{s.w}$ and the end $t_j^{f.w}$ of the work j are determined by the following formulas:

$$t_j^{s.w} = \begin{cases} t_j^{f.w} - t_j & \text{at } t_j^s + t \leq t_j^f; \\ t_j^f & \text{at } t_j^s + t \geq t_j^f; \end{cases}$$

$$t_j^{f.w} = \begin{cases} t_j^f & \text{at } t_j^s + t \leq t_j^f; \\ t_j^{s.w} + t_j & \text{at } t_j^s + t \geq t_j^f. \end{cases}$$

Conclusions

The proposed method of linear graph calculating on the basis of the Project technological dependencies model (PTDM) can significantly extend the capabilities of traditional linear graphs in the planning and organization of construction works, as well as a tool for the control, coordination, regulation and supervision of construction production.

References

1. Polesie P., Frödell M., Josephson P.E. Implementing Standardisation in Medium-Sized Construction Firms: Facilitating Site Managers' Feeling of Freedom through a Bottom-up Approach. *Proceedings for the 17th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Taipei, Taiwan, 15–17 July 2009, pp. 317–326.
2. Borodin S.I. [Definition and Functions of the Developer on the Construction Market]. *Construction Economics*, 2011, vol. 3, pp. 50–53.
3. Gusev E.V. Construction and Assembly Works Planning: Optimization or Search for Solutions. *3-rd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2017)*. SHS Web Conf., 2017, vol. 35. DOI: 10.1051/shsconf/20173501147
4. Zhou J., Love P.E., Wang X., Teo K.L., Irani Z. A Review of Methods and Algorithms for Optimizing Construction Scheduling. *Journal of the Operational Research Society*, 2013, vol. 64 (8), pp. 1091–1105. DOI: 10.1057/jors.2012.174
5. Galloway P.D. Survey of the Construction Industry Relative to the Use of CPM Scheduling for Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2006, vol. 132 (7), pp. 697–711. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2006)132:7(697)
6. Caldas C.H., Soibelman L. Automating Hierarchical Document Classification for Construction Management Information Systems. *Automation in Construction*, 2003, vol. 12 (4), pp. 395–406. DOI: 10.1016/S0926-5805(03)00004-9
7. Ma G., Wang A., Li N., Gu L., Ai Q. Improved Critical Chain Project Management Framework for Scheduling Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2014, vol. 140 (12), p. 04014055. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000908
8. Mincks W., Johnston H. *Construction Jobsite Management*. 3th ed. Cengage Learning. 2010, 480 p.
9. Lyapina A.R., Borodin S.I. Use of Building Information Modelling (BIM) in Construction: the State Expert Inspection of Construction Projects in Russia. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real Estate*, 2018, vol. 8, no. 2, pp. 11–17. DOI: 10.21285/2227-2917-2018-2-11-17
10. Gusakov A.A. *Sistemotekhnika stroitel'stva* [Systems and Techniques for Construction]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 368 p.
11. Gusakov A.A. *Organizatsionno-tekhnologicheskaya nadezhnost' stroitel'nogo proizvodstva* [Organizational and Technological Reliability of Construction Operations]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974. 252 p.
12. Baldwin A., Bordoli D. *Handbook for Construction Planning and Scheduling*. UK, John Wiley & Sons, 2014. 408 p. DOI: 10.1002/9781118838167
13. Kothari C.R. *Research Methodology: Methods and Techniques*. New Delhi, New Age International, 2004, 401 p.
14. Halpin D.W. *Construction Management*. 4th ed. John Wiley & Sons, 2011. 448 p.
15. Voropaev V.I. *Modeli i metody kalendarnogo planirovaniya v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya stroitel'stvom* [Scheduling Models and Methods within Automated Control System]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975. 232 p.
16. Gusev E.V. *Tekhnologicheskoye modelirovaniye i sbalansirovannoye planirovaniye stroitel'no-montaznykh rabot* [Technological Dependence and Balanced Planning of Construction Works]. Chelyabinsk, Redaktor Publ., 1990. 147 p.

Received 25 May 2019

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВОМ РАБОТ НА ОСНОВЕ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТА****Е.В. Гусев***Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

В статье подчеркивается важность календарного планирования в системе управления строительным производством. Календарный план и его составная часть, график строительства, служат основным источником информации для решения задач логистического и инженерного характера. Проведен анализ порядка разработки календарного плана строительства объекта. Выявлено, что в применяемых методиках разработки графиков строительства отсутствуют количественные ограничения при: а) определении минимальной продолжительности строительства объекта; б) максимального совмещения производства технологически взаимосвязанных работ; в) моделировании строительства объекта.

Приведено описание модели объектных технологических зависимостей (МОТЗ), которая отражает технологию строительства объекта. Основными параметрами МОТЗ являются:

- 1) количественные оценки технологических связей между работами;
- 2) временная область выполнения работы;
- 3) точки критичности каждой работы;
- 4) продолжительность строительства объекта;
- 5) максимальное количество ресурсов типа мощности, которое можно использовать на работах.

На основе МОТЗ определяется технологически возможная минимальная продолжительность строительства.

Математическое описание методики привязки технологически взаимосвязанных работ во времени дает возможность решить задачу их максимального совмещения.

Ключевые слова: модель объектных технологических зависимостей (МОТЗ), календарный план, технология производства работ, организационно-технологические модели.

Литература

1. Polesie, P. *Implementing Standardisation in Medium-Sized Construction Firms: Facilitating Site Managers' Feeling of Freedom through a Bottom-up Approach* / P. Polesie, M. Frödell, P.E. Josephson // *Proceedings for the 17th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Taipei, Taiwan, 15–17 July 2009. – P. 317–326.
2. Бородин, С.И. *Понятие и функции застройщика на рынке жилищного строительства* / С.И. Бородин // *Экономика строительства*. – 2011. – № 3. – С. 50–53.
3. Gusev, E.V. *Construction and assembly works planning: optimization or search for solutions* / E.V. Gusev // *3-rd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2017)*. SHS Web Conf. – 2017. – Vol. 35. DOI: 10.1051/shsconf/20173501147
4. *A review of methods and algorithms for optimizing construction scheduling* / J. Zhou, P.E. Love, X. Wang et al. // *Journal of the Operational Research Society*. – 2013. – Vol. 64 (8). – P. 1091–1105. DOI: 10.1057/jors.2012.174
5. Galloway, P.D. *Survey of the construction industry relative to the use of CPM scheduling for construction projects* / P.D. Galloway // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2006. – Vol. 132 (7). – P. 697–711. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2006)132:7(697)
6. Caldas, C.H. *Automating hierarchical document classification for construction management information systems* / C.H. Caldas, L. Soibelman // *Automation in Construction*. – 2003. – Vol. 12 (4). – P. 395–406. DOI: 10.1016/S0926-5805(03)00004-9
7. *Improved critical chain project management framework for scheduling construction projects* / G. Ma, A. Wang, N. Li et al. // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2014. – Vol. 140 (12). – P. 04014055. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000908

8. Mincks, W. *Construction jobsite management* / W. Mincks, H. Johnston. – 3th ed. – Cengage Learning, 2010. – 480 p.
9. Lyapina, A.R. *Use of building information modelling (BIM) in construction: the state expert inspection of construction projects in Russia* / A.R. Lyapina, S.I. Borodin // *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real Estate.* – 2018. – Vol. 8, no. 2. – P. 11–17. DOI: 10.21285/2227-2917-2018-2-11-17
10. Гусаков, А.А. *Системотехника строительства* / А.А. Гусаков. – М.: Стройиздат, 1983. – 368 с.
11. Гусаков, А.А. *Организационно-технологическая надежность строительного производства* / А.А. Гусаков. – М.: Стройиздат, 1974. – 252 с.
12. Baldwin, A. *Handbook for construction planning and scheduling* / A. Baldwin, D. Bordoli. – UK, John Wiley & Sons, 2014. – 408 p. DOI: 10.1002/9781118838167
13. Kothari, C.R. *Research methodology: Methods and techniques* / C.R. Kothari. – New Delhi: New Age International, 2004. – 401 p.
14. Halpin, D.W. *Construction management* / D.W. Halpin. – 4th ed. – John Wiley & Sons, 2011. – 448 p.
15. Воропаев, В.И. *Модели и методы календарного планирования в автоматических системах управления строительством* / В.И. Воропаев. – М.: Стройиздат, 1975. – 232 с.
16. Гусев, Е.В. *Технологическое моделирование и сбалансированное планирование строительно-монтажных работ* / Е.В. Гусев. – Челябинск: Редактор, 1990. – 147 с.

Гусев Евгений Васильевич, д-р техн. наук, профессор кафедры прикладной экономики, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; gusev@yus.ru.

Поступила в редакцию 25 мая 2019 г.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Gusev, E.V. Using Object Construction Model for Implementation Building Works Management / E.V. Gusev // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 147–155. DOI: 10.14529/ctcr190314

FOR CITATION

Gusev E.V. Using Object Construction Model for Implementation Building Works Management. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 147–155. DOI: 10.14529/ctcr190314

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

УДК 681.5.015

DOI: 10.14529/ctcr190315

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДРОБИЛЬНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Д.А. Шнайдер, Е.А. Калинина

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В связи с высоким спросом на железорудные окатыши на российском внутреннем и мировом рынках высокую актуальность имеет задача повышения объемов производства железорудного концентрата при обеспечении требуемого качества. В работе предложена общая технико-экономическая постановка задачи оптимизации дробильно-обогажительной фабрики (ДОФ) по критерию максимума маржинальной прибыли предприятия. Решение задачи выполняется при соблюдении технологических ограничений по режиму работы технологической секции, типу производимого концентрата, обеспечению требуемого качества концентрата на выходе, составу работающего оборудования и другим параметрам. Подробно рассмотрена частная задача повышения производительности технологической секции ДОФ за счет оптимизации режимов работы оборудования. Традиционным подходом к решению данной задачи является применение физико-химических моделей в сочетании с экспериментальным изучением технологического процесса. В работе предложен подход на основе применения оптимизационной математической модели, разработанной с использованием интеллектуального анализа статистических данных Data Mining. В качестве метода построения модели принят метод деревьев принятия решений. Поиск наилучшего решения в смысле выбранного критерия выполняется методом перебора. Результатом моделирования является оценка производительности секции в зависимости от влияния входных управляющих факторов, параметров исходной руды, а также технологических ограничений. В работе приведен методический пример применения модели управления технологическим процессом производства железорудного концентрата технологической секции ДОФ с повышением производительности до 7%. Практическое применение предложенного подхода позволит в рамках существующей автоматизированной системы управления в режиме реального времени предоставлять оператору рекомендации о корректировке параметров управления режимами работы технологического оборудования секции ДОФ с учетом текущих условий технологического процесса.

Ключевые слова: дробильно-обогажительная фабрика, Data Mining, деревья принятия решений.

Введение

Дробильно-обогажительные фабрики (ДОФ) являются основным звеном в технологическом процессе переработки твёрдых полезных ископаемых с целью получения высококачественного железорудного концентрата. Железорудный концентрат является сырьем для производства железорудных окатышей, используемых в черной металлургии.

В связи с высоким спросом на железорудные окатыши на рынке России и в мире высокую актуальность имеет задача повышения объемов производства при обеспечении требуемого качества железорудного концентрата путем оптимизации работы оборудования технологических секций ДОФ.

На сегодняшний день значительное количество работ посвящено решению задач повышения эффективности ДОФ. Традиционным подходом здесь является применение физико-химических моделей в сочетании с экспериментальным изучением технологического процесса. Так, в работах [1–4] авторами рассмотрен технологический процесс обогащения руды, приведено наиболее рас-

пространственное оборудование для его осуществления, показаны методы оптимизации и интенсификации технологических процессов обогащения. Методы оптимального управления технологическими процессами обогащительных фабрик описаны в работах [5–9].

Применение на промышленных предприятиях современных приборов для измерения параметров технологических процессов в комплексе с развитием информационных технологий стало предпосылкой к развитию технологий интеллектуального анализа больших объемов данных Data Mining [10–12], где на основании статистических данных разрабатываются математические модели, которые далее используются при разработке автоматизированных систем управления и оптимизации технологических процессов [13–22].

Несмотря на большой объем имеющейся литературы, на сегодняшний день задача оптимизации управления технологической секции ДОФ на основе применения математических моделей, работающих в режиме советчика, не решена в полной мере, что определяет актуальность работы.

1. Подход к решению оптимизационной задачи

Целью работы является максимизация маржинальной прибыли (МП) ДОФ, которая может быть определена по формуле

$$МП = П \cdot (C_k - Z_{уд}(П)) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $П$ – производительность по руде; C_k – стоимость 1 тонны конечного продукта; $Z_{уд}$ – переменные удельные затраты на производство продукта.

Производительность по руде ($П$), подаваемой на вход технологических секций, определяется функцией

$$П = f(u_1, u_2, \dots, u_N, z_1, z_2, \dots, z_K, y_1, y_2, \dots, y_M), \quad (2)$$

где N, K, M – количество используемых в модели управляемых показателей технологического процесса, качественных показателей исходной руды и железорудного концентрата соответственно.

Переменные удельные затраты на производство продукта ($Z_{уд}$) в рамках данной задачи определяются по формуле

$$Z_{уд} = Э/П + С/П + Ш/П + X_v/П, \quad (3)$$

где $Э$ – электроэнергия; $С$ – помольные стержни для стержневых мельниц; $Ш$ – помольные шары для шаровых мельниц; X_v – потери железа в хвостах.

На рис. 1 представлен общий вид графиков зависимости переменных удельных затрат на производство железорудного концентрата и маржинальной прибыли от производительности.

Из рис. 1 видно, что в точке с производительностью $П_1$ достигается минимум удельных переменных затрат, при этом, однако, максимум маржинальной прибыли в общем случае достигается в точке с производительностью $П_2$.

Таким образом, необходимо определить оптимальные значения управляемых факторов u_i при заданных значениях качественных показателей исходной руды z_j , железорудного концентрата y_l и цене продукта C_k , обеспечивающих максимум маржинальной прибыли (3), определяемой с учетом технологических ограничений:

$$u_{i \min} < u_i < u_{i \max}, \quad (4)$$

$$y_{j \min} < y_j < y_{j \max}, \quad (5)$$

где $i = 1 \dots N, j = 1 \dots K$.

Решение задачи (1)–(5) выполняется при соблюдении следующих технологических ограничений:

- режим работы технологической секции по типу производимого концентрата;
- обеспечение требуемого качества концентрата на выходе;
- состав работающего оборудования;
- потери железа в хвостах;
- расход мелющих тел (шаров, стержней);
- потребление электроэнергии технологическим оборудованием.

Выполнение вышеуказанных технологических ограничений должно осуществляться с учетом погрешности используемых средств измерений.

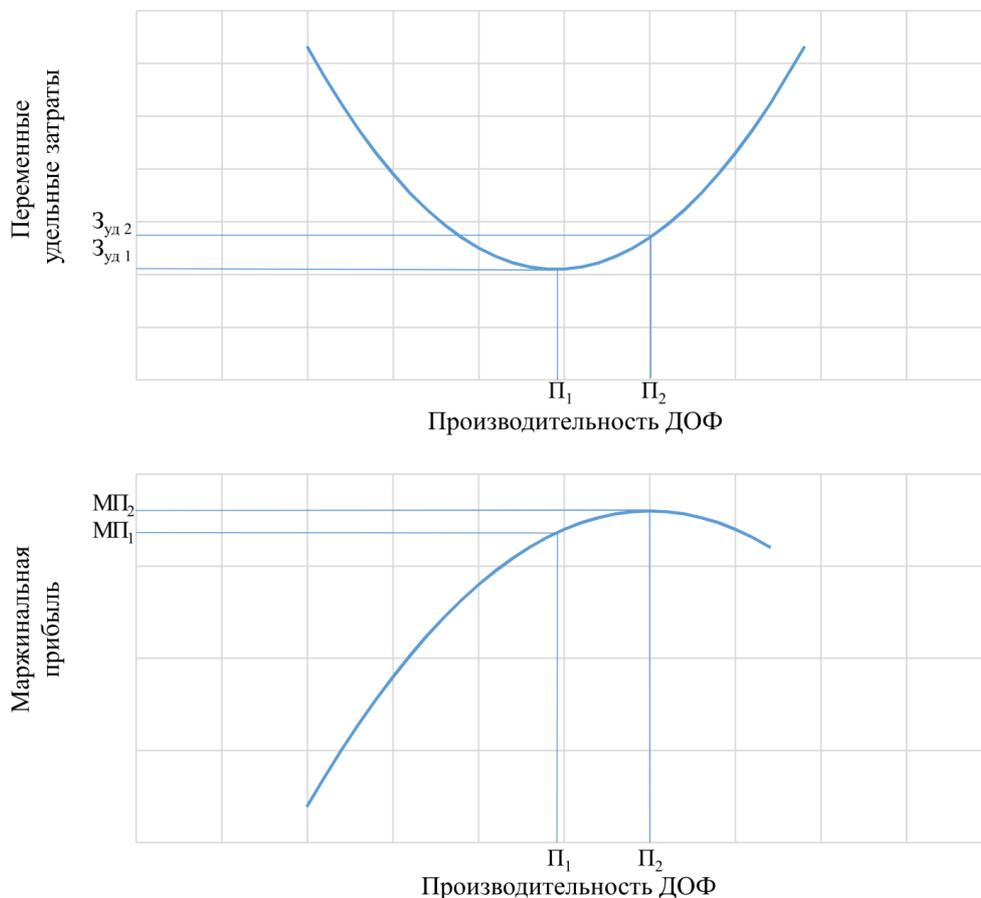


Рис. 1. Зависимости переменных удельных затрат и маржинальной прибыли от производительности

Приведенный выше подход описывает наиболее общую технико-экономическую постановку задачи оптимизации ДОФ. На практике могут применяться иные упрощенные критерии оптимизации, обусловленные сложившейся рыночной конъюнктурой, технологическими особенностями производства и другими факторами. Одним из таких часто применяемых критериев, который рассмотрен далее, является производительность технологической секции по руде.

2. Разработка модели секции ДОФ на основе метода деревьев решений

Для решения поставленной задачи в качестве метода построения модели для управления технологическим процессом производством концентрата на секции ДОФ принят метод деревьев решений.

Для построения и обучения модели управления использованы статистические данные эксплуатации оборудования за два месяца работы технологической секции. Данные эксплуатации разделены на два кластера в зависимости от типа производимого концентрата: «Кластер 1» и «Кластер 2». Для каждого режима работы строится модель управления технологическим процессом. Данные эксплуатации проходят обработку, которая заключается в проверке корректности «сырых» данных.

С целью учета состава работающего оборудования в модель введены комбинированные переменные. В каждый момент времени происходит оценка, результатом которой является вывод о том, какое оборудование находится в работе. В комбинированную переменную производится запись значения параметра оборудования, находящегося в работе.

Модель построена на основе одного из современных алгоритмов Classification and Regression Tree (CART) в среде разработки программного обеспечения для языка программирования R.

На рис. 2 представлен фрагмент модели управления технологическим процессом одной технологической секции по производству железорудного концентрата в первом режиме работы. Во фрагменте модели представлены нормированные значения параметров.

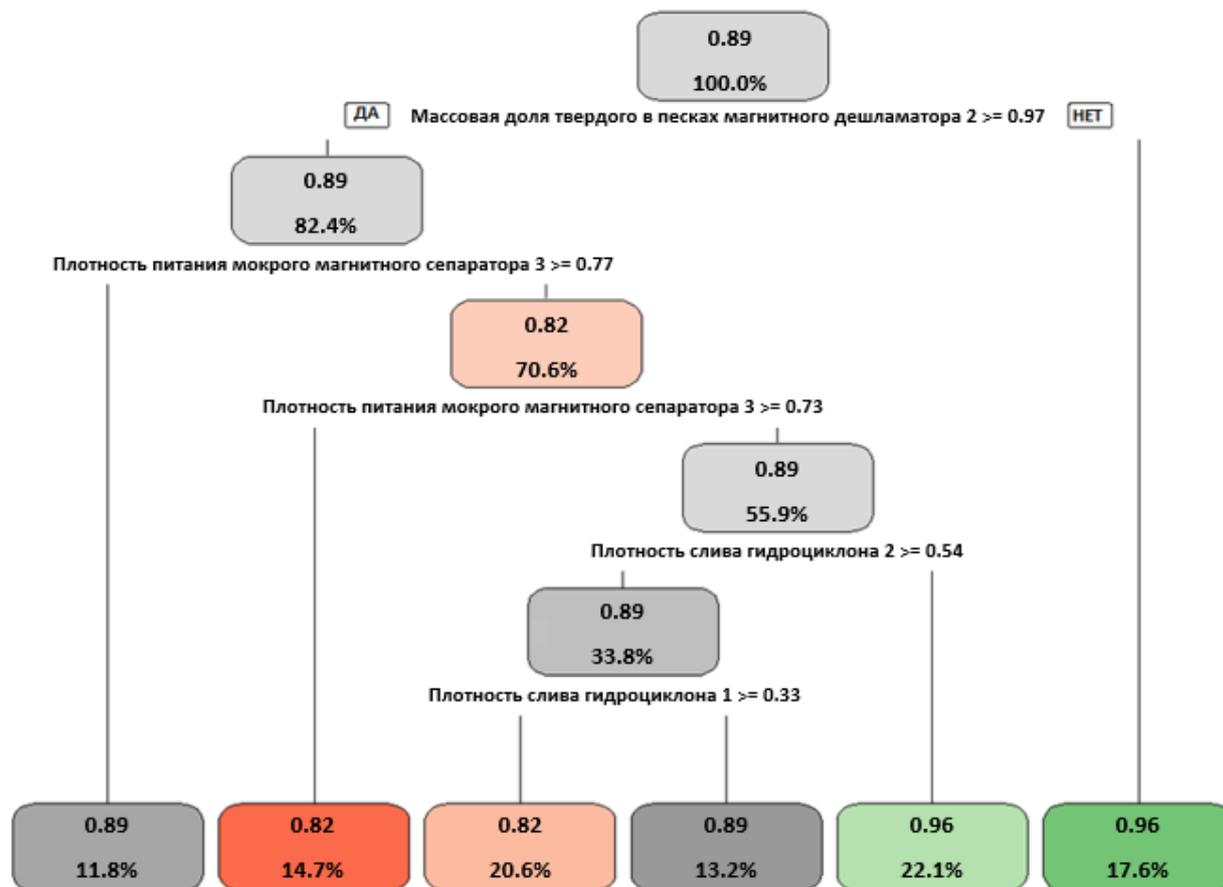


Рис. 2. Фрагмент дерева модели в кластере 1

На рис. 3 проиллюстрирована ошибка предсказанных значений в точках применимости модели на исходных статистических данных за два месяца работы технологической секции. Линиями отмечены границы допустимых отклонений в рамках подкласса.

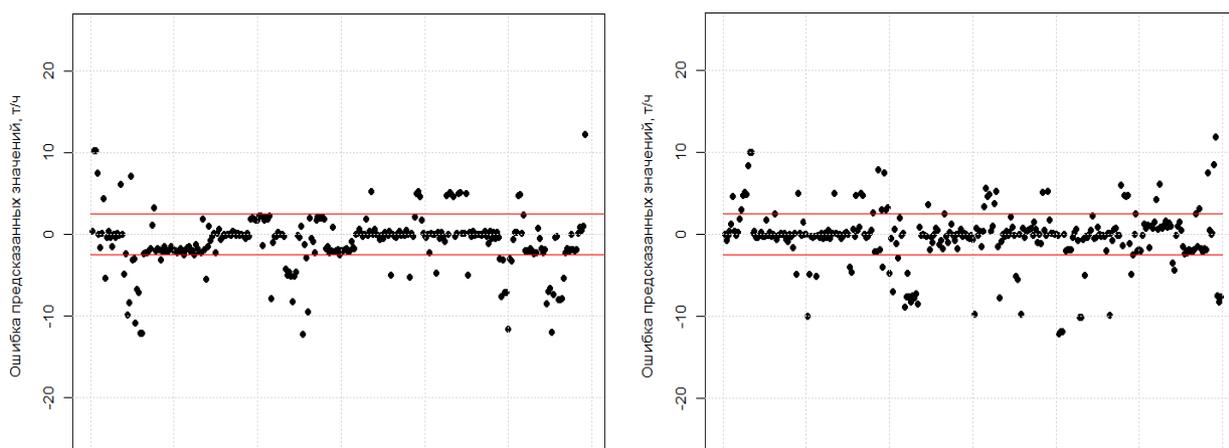


Рис. 3. Ошибка предсказанных значений в первом и во втором кластерах

Надежность модели существенно зависит от количества исходных статистических данных в соответствующем диапазоне изменения производительности и при достаточном наборе представительных данных достигает не менее 70–80 %. По мере накопления статистики надежность модели будет повышаться в более широком диапазоне производительности.

3. Методический пример оптимизации секции ДОФ по критерию максимума производительности

Методом оптимизации выбран один из прямых методов оптимизации – метод перебора (метод общего поиска). Главными преимуществами этого метода применимо к данной задаче является независимость поиска решения от вида и характера целевой функции и простота алгоритма поиска глобального максимума функции.

Рассмотрим пример использования модели управления технологическим процессом одной секции ДОФ по производству железорудного первого типа концентрата.

Входными данными для модели являются исходные статистические данные на некоторый момент времени t , прошедшие проверку на корректность.

На рис. 2 представлен фрагмент модели, необходимый для формирования совета по входным данным для момента времени t . Каждый лист дерева решений соответствует совету модели. В каждом листе указаны дискретные значения целевой переменной. Исходя из правил в узлах дерева, для каждого совета формируется диапазон допустимых значений управляемых параметров.

Далее производится ряд проверок для выбора «подходящих» советов:

- проверка принадлежности значений неуправляемых параметров диапазону допустимых значений;
- значение параметра «Содержание железа в концентрате» в совете должно быть не меньше фактического значения;
- значение параметра «Производительность» в совете должно быть больше фактического значения.

Аналогичным образом учитываются другие параметры технологического процесса, в том числе потери железа в хвостах, расход мелющих тел и потребление электроэнергии технологическим оборудованием.

Пример совета модели приведен в таблице. В ней представлены фактические (текущие) значения параметров на момент времени t и диапазон допустимых значений совета модели. Значения параметров представлены в относительных единицах.

Совет модели

№ п/п	Название параметра	Фактическое значение	Совет модели
1	Производительность	0,82	0,89
2	Содержание железа в концентрате	0,79	0,79
3	Массовая доля твердого в песках магнитного дешламатора 1	0,98	0,96–1
4	Массовая доля твердого в песках магнитного дешламатора 2	0,99	$\geq 0,98$
5	Массовая доля твердого в песках магнитного дешламатора 3	0,97	0,97–1
6	Плотность питания мокрого магнитного сепаратора 3	0,75	$< 0,73$
7	Давление пульпы на входе гидроциклона 1	0,87	0,84–0,89
8	Давление пульпы на входе гидроциклона 2	0,90	0,81–0,92
9	Плотность слива гидроциклона 1	0,64	0,54–0,68
10	Плотность слива гидроциклона 2	0,61	$< 0,54$
11	Доля легкообогатимой руды	1,00	1,00
12	Обогатимость руды	0,65	0,45–1,00
13	Содержание железа в дробленой руде	0,72	0,48–0,82
14	Гранулометрический состав руды	0,57	0,42–0,99
15	Содержание железа в руде	0,66	0,39–,89
16	Содержание серы в руде	0,34	0,01–0,70
17	Содержание серы в концентрате	0,24	0,01–0,71

Для достижения максимального расчетного значения производительности технологической секции при данных начальных условиях (текущих значениях параметров) необходимо фактические значения всех управляемых параметров привести к диапазону допустимых значений совета модели.

Согласно приведенному в таблице совету модели для повышения производительности на 7 % необходимо:

- понизить значение параметра «Плотность питания мокрого магнитного сепаратора 3» до значений, входящих в диапазон $< 0,73$;
- понизить значение параметра «Плотность слива гидроциклона 2» до значений, принадлежащих диапазону $< 0,54$.

Дообучение модели на новых данных эксплуатации технологического оборудования в процессе работы системы обеспечивает ее адаптивность к изменению параметров технологического процесса с течением времени.

Выводы

1. В работе предложена в общем виде постановка задачи повышения маржинальной прибыли ДОФ на основе применения оптимизационной модели управления технологическим процессом производством концентрата.

2. Рассмотрено построение математической модели секции ДОФ на основе метода деревьев решений. Результатом моделирования является оценка производительности секции в зависимости от влияния входных управляющих факторов, параметров исходной руды и технологических ограничений, включающих:

- режим работы технологической секции по типу производимого концентрата;
- обеспечение требуемого качества концентрата на выходе;
- состав работающего оборудования;
- потери железа в хвостах;
- расход мелющих тел (шаров, стержней);
- потребление электроэнергии технологическим оборудованием.

3. В работе приведен методический пример применения модели управления технологическим процессом производства железорудного концентрата технологической секции ДОФ с повышением производительности на 7 %.

4. В рамках развития работ планируется на базе предложенного подхода к оптимизации ДОФ выполнить разработку алгоритмического и программного обеспечения системы-советчика, которая позволит в режиме реального времени на основе текущих (фактических) значений параметров секции предоставлять персоналу оперативную информацию о корректировке параметров управления режимами работы технологического оборудования секции ДОФ в зависимости от выбираемого пользователем технического или технико-экономического критерия оптимизации.

Литература

1. Абрамов, А.А. *Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых* / А.А. Абрамов. – М.: Горная книга, 2012. – 656 с.
2. Серго, Е.Е. *Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых* / Е.Е. Серго. – М.: Недра, 1985. – 282 с.
3. Андреев, С.Е. *Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых* / С.Е. Андреев, В.В. Зверевич, В.А. Перов. – М.: Недра, 1980. – 415 с.
4. Авдохин, В.М. *Основы обогащения полезных ископаемых* / В.М. Авдохин. – М.: Горная книга, 2010. – 417 с.
5. Моркун, В.С. *Адаптивные системы оптимального управления технологическими процессами горно-обогажительными комбинатами* / В.С. Моркун, И.А. Луцевич. – М.: Минерал, 2009. – 261 с.
6. Тихонов, О.Н. *Автоматизация производственных процессов на обогажительных фабриках* / О.Н. Тихонов. – М.: Недра, 1985. – 207 с.
7. Козин, В.З. *Автоматизация производственных процессов на обогажительных фабриках: учеб. для вузов* / В.З. Козин, А.Е. Троп, А.Я. Комаров. – М.: Недра, 1980. – 336 с.

8. Процупто, В.С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами обогатительных комбинатов / В.С. Процупто. – М.: Недра, 1987. – 252 с.
9. Принципы построения математических моделей в АСУТП производства железорудных окатышей / А.П. Буткарев, Е.В. Некрасова, Н.Г. Машир, Ю.В. Северин // Сталь. – 1990. – № 3. – С. 15–21.
10. Дюк, В.А. *Data Mining: учеб. курс* / В.А. Дюк, А.П. Самойленко. – СПб.: Питер, 2001. – 368 с.
11. Williams, G. *Data Mining with Rattle and R: The Art of Excavating Data for Knowledge Discovery* / Graham Williams. – USA, Springer, 2011. – 396 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-9890-3_17
12. Программная реализация метода деревьев решений для реализации задач классификации и прогнозирования / Т.В. Зайцева, Н.В. Васина, О.П. Пусная и др.; НИУ БелГУ // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. – 2013. – № 8 (151), вып. 26/1. – С. 121–127.
13. Бахвалов, Л.А. Построение и оптимизация математических моделей по экспериментальным данным / Л.А. Бахвалов, М.А. Комаров. – М.: Изд-во МГТУ, 1997. – 320 с.
14. Ашихмин, А.А. Разработка и принятие управленческих решений: формальные модели и методы выбора / А.А. Ашихмин. – М.: Изд-во МГТУ, 1995. – 80 с.
15. Краснощёков, П.С. Принципы построения моделей / П.С. Краснощёков, А.А. Петров. – М.: Фазис, 2000. – 400 с.
16. Kazarinov, L.S. *Oblong ellipsoid method in process efficiency control* / L.S. Kazarinov, T.A. Barbasova // 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). – 2016. – Paper number 7414875. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414875
17. Kazarinov, L.S. *Elliptic component analysis* / L.S. Kazarinov, T.A. Barbasova // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2017. – Paper number 7910936. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910936
18. Kazarinov, L.S. *Identification method of blast-furnace process parameters* / L.S. Kazarinov, T.A. Barbasova // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 685. – P. 137–141. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.137
19. Kolesnikova, O.V. *Identification of the Efficient Manufacturing Characteristics* / O.V. Kolesnikova, L.S. Kazarinov, A.D. Nelubina // Energy Procedia. – 2017. – P. 79–88. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.602
20. Ризаев, И.С. Интеллектуальный анализ данных для поддержки принятия решений / И.С. Ризаев, Я. Рахал. – Казань: Изд-во МОУН РТ, 2011. – 172 с.
21. Соколов, Б.В. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов / Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2004. – № 6. – С. 6–16.
22. Ларичев, О.И. Теория и методы принятия решений / О.И. Ларичев. – М.: Логос, 2000. – 295 с.

Шнайдер Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, профессор, кафедра автоматизации и управления, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; shnaiderda@susu.ru.

Калинина Екатерина Александровна, аспирант, кафедра автоматизации и управления, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kalininaea@susu.ru.

Поступила в редакцию 5 марта 2019 г.

PRODUCTIVITY INCREASING OF THE CRUSHING AND BENEFICIATION PLANT BASED ON THE OPTIMIZATION MODEL

D.A. Shnayder, shnaiderda@susu.ru,

E.A. Kalinina, kalininaea@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Due to the fact that the demand for iron-ore pellets in the Russian and international markets is high, the task of increasing the volume of iron-ore concentrate production while providing required quality is urgent. The paper sets a general engineering-and-economical target to improve crushing and ore beneficiation plant (CBP) operation by the criterion of maximum marginal profit of the enterprise. The task is solved by observing technological constraints according to the regime of the technological unit operation, type of the produced concentrate, the provision of the required quality of the concentrate at the end of the process, the equipment configuration and other parameters. The specific task of increasing efficiency of the technological unit of the CBP by means of optimization of the equipment operation has been thoroughly considered. Traditionally such tasks are solved by applying a physical and chemical model coupled with experimental research of the technological process. The paper presents the approach based on the application of the optimization mathematical model, developed using intellectual analysis of statistical data – Data Mining. To develop the model, the method of decision tree was used. The search method is used to find the best decision in terms of the chosen criterion. Modelling results in evaluation of the unit efficiency depending on the influence of an input controlling factor, parameters of the base ore, as well as technological constraints. A methodological example of applying the model of control over the technological process of iron-ore concentrate production at the technological unit of the grinding and pellet plant with the increased efficiency of up to 7% was provided. Practical implementation of the proposed approach will allow the operator to obtain recommendations about correcting the control parameters of the technological equipment operation using the existing automated control system in a real time mode at the unit of the DOF, taking into account current conditions of the technological process.

Keywords: crushing and beneficiation plant, Data Mining, decision trees.

References

1. Abramov A.A. *Pererabotka, obogashcheniye i kompleksnoye ispol'zovaniye tverdykh poleznykh iskopayemykh* [Processing, Enrichment and Comprehensive Utilization of Solid Minerals]. Moscow, Gornaya kniga, 2012. 656 p.
2. Sergo E.E. *Drobleniye, izmel'cheniye i grokhocheniye poleznykh iskopayemykh* [Crushing, Grinding and Screening of Minerals]. Moscow, Nedra, 1985. 282 p.
3. Andreyev S.E., Zverevich V.V., Perov V.A. *Drobleniye, izmel'cheniye i grokhocheniye poleznykh iskopayemykh* [Crushing, Grinding and Screening of Minerals]. Moscow, Nedra, 1980. 415 p.
4. Avdokhin V.M. *Osnovy obogashcheniya poleznykh iskopayemykh* [Fundamentals of Mineral Processing]. Moscow, Gornaya kniga, 2010. 417 p.
5. Morkun V.S., Lutsevich I.A. *Adaptivnyye sistemy optimal'nogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami gorno-obogatitel'nyimi kombinatami* [Adaptive Systems of Optimal Control of Technological Processes at Mining and Processing Plants]. Moscow, Mineral, 2009. 261 p.
6. Tikhonov O.N. *Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov na obogatitel'nykh fabrikakh* [Automation of Production Processes at the Processing Plants]. Moscow, Nedra, 1985. 207 p.
7. Kozin V.Z., Trope A.E., Komarov Y.A. *Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov na obogatitel'nykh fabrikakh: ucheb. dlya vuzov* [Automation of Production Processes at the Processing Plants. Textbook for Universities]. Moscow, Nedra, 1980. 336 p.
8. Protsuto V.S. *Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami obogatitel'nykh kombinatov* [Automated Control Systems of Technological Processes in Concentrating Plants]. Moscow, Nedra, 1987. 252 p.

9. Bochkarev A.P., Nekrasov E.V., Mashir N.G., Siverin Yu.V. [Principles of Construction of Mathematical Models in Process Control Production of Iron ore Pellets]. *Steel*, 1990, no. 3, pp. 15–21. (in Russ.)
10. Duke V., Samoilenko A.P. *Data Mining: a Training Course*. St. Petersburg, Piter, 2001. 368 p.
11. Williams, Graham. *Data Mining with Rattle and R: The Art of Excavating Data for Knowledge Discovery*. USA, Springer, 2011. 396 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-9890-3_17
12. Zaytseva T.V., Vasina N.V., Pusnaya O.P. et al. [Software Implementation of the Method of Decision Trees for Implementation of Tasks of Classification and Prediction]. *Scientific Statement BSU. Ser. History. Political Science. Economics. Informatics*, 2013, no. 8 (151), iss. 26/1, pp. 121–127. (in Russ.)
13. Bakhvalov L.A., Komarov M.A. *Postroyeniye i optimizatsiya matematicheskikh modeley po eksperimental'nykh dannym* [Development and Optimization of Mathematical Models from Experimental Data]. Moscow, Publishing house of Moscow State Mining University, 1997. 320 p.
14. Ashihmin A.A. *Razrabotka i prinyatiye upravlencheskikh resheniy: formal'nyye modeli i metody vybora* [Elaboration and Making of Managerial Decisions: Formal Models and Selection Methods]. Moscow, MGU State Publishing House, 1995. 80 p.
15. Krasnoshchekov P.S., Petrov A.A. *Printsipy postroyeniya modeley* [Principles of Creation of Models]. J. Moscow, Fazis, 2000. 400 p.
16. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Oblong Ellipsoid Method in Process Efficiency Control. *2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*, 2016, paper number 7414875. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414875
17. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Elliptic Component Analysis. *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2017, paper number 7910936. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910936
18. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Identification Method of Blast-Furnace Process Parameters. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 685, pp. 137–141. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.137
19. Kolesnikova O.V., Kazarinov L.S., Nelubina A.D. Identification of the Efficient Manufacturing Characteristics. *Energy Procedia*, 2017, vol. 134, pp. 79–88. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.602
20. Rizaev I.S., Rakhhal Ya. *Intellectual'nyy analiz dannykh dlya podderzhki prinyatiya resheniy* [Intellectual Data Analysis for the Support of Decision Making]. Kazan, Publishing House of the Ministry of Education of the Republic of Tatarstan, 2011. 172 p.
21. Sokolov B.V., Yusupov R.M. [The Conceptual Bases for Assessment and Analysis of Quality Models and Polymodel Complexes]. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems*, 2004, no. 6, pp. 6–16. (in Russ.)
22. Larichev O.I. *Teoriya i metody prinyatiya resheniy* [Theory and Methods of Decision-Making]. Moscow, Logos, 2000. 295 p.

Received 5 March 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шнайдер, Д.А. Повышение производительности дробильно-обогащительной фабрики на основе оптимизационной модели / Д.А. Шнайдер, Е.А. Калинина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 156–164. DOI: 10.14529/ctcr190315

FOR CITATION

Shnayder D.A., Kalinina E.A. Productivity Increasing of the Crushing and Beneficiation Plant Based on the Optimization Model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 156–164. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190315

«УМНЫЙ ГОРОД»: СТАНДАРТЫ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

К.В. Макаренко¹, В.О. Логиновская²

¹ Министерство информационных технологий и связи Челябинской области, г. Челябинск, Россия

² ОГБУ «Челябинский региональный центр навигационно-информационных технологий», г. Челябинск, Россия

Рассматриваются основные трактовки понятия «умный город», описаны ключевые действующие международные и национальные стандарты, описаны основные проблемы цифровизации городского хозяйства в России.

Формирование стандартов «умного города» в России актуально тем, что такие стандарты выступают ориентиром в планировании долгосрочных и краткосрочных мероприятий по цифровизации городского хозяйства. Открытые и универсальные стандарты ускоряют и удешевляют разработки в этой сфере.

Вместе с тем к настоящему моменту Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстроем России) были разработаны базовые и дополнительные требования к «умным городам». Представлен сравнительный анализ международных стандартов «умного города» с требованиями, разработанными Минстроем России.

В некоторых странах, активно реализующих программы по развитию «умных городов», в качестве ориентиров используются локализованные с учетом местной специфики международные стандарты. Так, для реализации программ по развитию «умных городов» в Республике Корея (программа «Умный Сеул») были локализованы стандарты, разработанные техническим комитетом ISO/TC 268, в том числе стандарт ISO 37120:2014 «Устойчивое развитие сообществ – индикаторы городских сервисов и качества жизни», а для городов – участников программы «Сто умных городов» («Smart Cities Mission») в Индии рекомендуется следование набору стандартов Британского института стандартизации (BSI) при реализации программы на всех уровнях.

В работе использованы разработки международной организации по стандартизации (ISO), Британского института стандартизации, нормативные документы, подготовленные Минстроем России, и другие исследования, касающиеся развития «умных городов».

Ключевые слова: умный город, цифровая трансформация, регулирование, сквозные технологии, стандарты.

Введение

Концепция «умного города», начавшая свое формирование в конце XX века, активно обсуждается в России. Редкий форум, посвященный городской тематике и информационно-коммуникационным технологиям, обходится без дискуссий, связанных с реализацией проекта «умного города».

«Умный город» (Smart city) не имеет четкой дефиниции, это очень многоплановое явление. Для «умного города» существует множество определений, среди них следующие:

- «умный город» – это обеспечение современного качества жизни за счет применения инновационных технологий, которые предусматривают экономичное и экологичное использование городских систем жизнедеятельности [1];

- «умный город» – это взаимосвязанная система коммуникативных и информационных технологий с интернетом вещей (IoT), благодаря которой упрощается управление внутренними процессами города и улучшается уровень жизни населения [2];

Краткие сообщения

• «умный город» – это структура, которая обеспечивает устойчивое развитие, повышение качества жизни и эффективное использование ресурсов для своих жителей [3];

• «умный город» – это город, в котором объединяются инженерная инфраструктура, ИТ-инфраструктура, социальная инфраструктура и бизнес-инфраструктура для использования коллективного интеллекта города [4].

Из перечисленных определений можно сделать обобщающий вывод о том, что «умный город» – совокупность мероприятий, направленных на повышение качества жизни населения за счет цифровизации различных сфер жизнедеятельности города.

По данным исследователей Венского технологического университета основные приоритеты развития в рамках «умного города» следующие: умная среда, умный образ жизни, умные люди, умная экономика, умная мобильность, умное управление (см. рисунок).



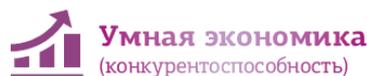
- Энергоэффективность
- Возобновляемые источники энергии
- Защита окружающей среды
- Экономия ресурсов



- Грамотное потребление
- Удобная планировка
- Социальное взаимодействие
- Здоровый образ жизни



- Квалифицированные пользователи ИКТ
- Доступное обучение
- Участие в общественной жизни, предприимчивость



- Продуктивность
- Новые продукты, сервисы, бизнес-модели
- Международное сотрудничество
- Гибкость



- Интегрированные транспортные системы
- Экологичные виды транспорта



- Вовлечение граждан в принятие решений
- Умные сервисы
- Открытые данные

Направления Smart City

Таким образом, «умный город» объединяет в себе множество различных сквозных технологий и систем, а к основным управленческим и экономическим эффектам реализации технологии «умный город» относятся:

- возможность получения объективной актуальной информации о городской инфраструктуре, на основе которой принимаются управленческие решения;
- возникновение новых сервисов пользования первичными услугами в сферах жилищно-коммунального хозяйства, экологии, общественного транспорта, медицины и других;
- возможность агрегации «больших данных» для последующего анализа использования в целях повышения качества предоставления государственных и муниципальных услуг и сервисов.

Несмотря на то, что проект «Умный город» уже реализуется в отдельных регионах нашей страны, концепция «умного города» только формируется, а сам термин уже используется во всем мире в различных смыслах в зависимости от контекста. То есть одной из ключевых проблем на сегодняшний день является отсутствие единого понимания концепции «умного города» в силу системности этого явления, интегрирующего в рамках единого городского пространства множество направлений: городское управление, транспорт, ЖКХ, здравоохранение, образование, туризм и т. д. Связано это прежде всего с новизной процесса. На текущий момент в России нет осознания архитектуры построения «умного города» и нет нормативной поддержки.

Для решения данной проблемы следует прежде всего сформировать нормативную базу, в которой будет прописано, что собой представляют «умные города», каковы механизмы их реализации и схемы финансирования.

Необходимо применение национальных стандартов и в дальнейшем региональных стандартов, единое определение, что такое «умный город» в России, система показателей эффективности исполнения мероприятий «умного города». В противном случае в городской среде появится слишком много не связанных между собой различных систем.

Актуальность формулирования стандартов для «умного города» в России объясняется тем, что они выступают ориентиром в планировании долгосрочных и краткосрочных целей развития городов и регионов, помогают в выборе приоритетных проектов. Также, согласно исследованиям, открытые и универсальные стандарты ускоряют разработки в этой сфере на 27 % и удешевляют – на 30 % [5].

Международные стандарты «умного города»

К настоящему моменту Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстроем России) уже были разработаны методические рекомендации к проектам «умных городов» [6], которые сейчас в рамках отдельных пилотных проектов начинают реализовываться в регионах страны. Кроме того, в марте 2019 года Минстроем России были опубликованы базовые и дополнительные требования к умным городам (стандарт «Умного города») [7]. Однако стандарт Минстроя только описывает набор типовых обязательных и дополнительных решений, т. е. является стандартным перечнем сервисов, рекомендуемых для внедрения. В дополнение к нему был запущен банк решений для «умных городов» [8], на который предлагается ориентироваться при формировании мероприятий проекта «Умный город». В описании решений содержатся ссылки на описания реализованных проектов с указанием места реализации, целей и задач проектов, их основных параметров и достигнутых эффектов.

Таким образом, развитие «умных городов» в России сейчас упирается в разработку соответствующих национальных стандартов.

Рассмотрим существующие международные стандарты.

Стандарт ISO. В 2014 году международной организацией по стандартизации (International Organization for Standardization, ISO) был разработан стандарт, определяющий основные характеристики «умных устойчивых городов» – ISO 37120:2014 «Устойчивое развитие сообществ – индикаторы городских сервисов и качества жизни». В нем учтены возможности его применения для любого города и муниципального образования вне зависимости от размера, территориального положения и финансового обеспечения.

Стандарт создан для использования городскими администрациями с целью:

- измерения динамики изменения качества городских услуг и качества жизни с течением времени;
- упрощения сравнения городов по широкому ряду критериев;
- распространения лучших практик.

Основной фокус стандарта направлен на энергоэффективность, доступность основных ресурсов для жителей (воды, электроэнергии) и экологическую устойчивость города. Таким образом, большее внимание уделено «устойчивости» города, чем применению ИКТ для повышения уровня жизни горожан, что, в свою очередь, объясняется тем, что стандарт направлен в большей мере не на города – лидеры в области внедрения новых технологий, а на города, расположенные по всему миру, имеющие разные цели и уровень развития.

На основе этого стандарта был разработан и запущен ряд проектов по созданию «умных городов», в том числе программа «Умный Сеул» Республики Корея. То есть в качестве ориентиров используются локализованные с учетом местной специфики международные стандарты.

Стандарты Британского института стандартизации (BSI). Британским институтом стандартизации был разработан основной набор стандартов, определяющих направление развития и критерии «умного города»:

- 1) PAS 180 (определение терминологии «умных городов») [9];
- 2) PAS 181 (инструкция по разработке стратегий «умных городов» и сообществ) [10];
- 3) PAS 182 (концептуальная модель «умного города»). Руководство по созданию модели для данных) [11];

Краткие сообщения

4) PD 8100 (обзор «умных городов») [12];

5) PD 8101 (руководство по планированию «умных городов») [13].

Среди них наибольший интерес представляют PAS 181, PD 8100 и PD 8101, поскольку содержат в себе критерии «умных» городов на уровне стратегического планирования. PAS 181 является утвержденным национальным стандартом, определяющим основные принципы, согласно которым должны реализовываться проекты по созданию «умных городов», в том числе формулирует рекомендации для городских администраций Великобритании и городов по всему миру, в то время как PD 8100 и PD 8101 представляют собой временные (действующие до утверждения национального стандарта) руководства.

Критерии определения участников программы Smart Cities Mission (Индия, программа «Сто умных городов»). Smart Cities Mission [14], программа по развитию ста «умных городов» (по состоянию на 1 июня 2019 года в процессе отбора в программу были включены 100 городов), была начата в 2016 году. Ее реализация рассчитана на 5 лет. Цель программы сформулирована как организация содействия городам, обладающим основными элементами городской инфраструктуры и стремящимся обеспечить достойный уровень жизни своих граждан, устойчивость окружающей среды и применение «умных» решений. Правительство Индии также заявляет, что одна из целей программы – отработка модели создания «умных городов» для последующего ее масштабирования по всей стране.

Критерии МСЭ и Европейской экономической комиссии ООН. В рамках реализации проекта «Объединенные «умные города» секретариат Комитета по жилищному хозяйству и землепользованию ЕЭК ООН в сотрудничестве с Агентством по окружающей среде Австрии (АОСА) и Международным союзом электросвязи (МСЭ) сформулировал показатели «умных» устойчивых городов. Они были разработаны в качестве отправной точки для принятия конкретных решений и мер и повышения уровня устойчивости города к существующим и потенциальным угрозам. Типология показателей указывает на «применимость» самого показателя: основные показатели могут использоваться всеми городами в глобальном масштабе; дополнительные показатели могут использоваться некоторыми городами в зависимости от их экономического потенциала, роста численности населения, географического положения и т. д.

Приведенный выше перечень стандартов «умного города», естественно, не является полным, но охватывает наиболее известные. В таблице представлен сравнительный анализ международных стандартов «умного города» со стандартом, разработанным Минстроем России.

Сравнительный анализ стандартов «умного города»

Стандарты, критерии «Умного города»	Сфера												
	Городское управление	Экономика	Транспорт	Телекоммуникации	Энергетика	ЖКХ	Экология	Безопасность	Образование	Здравоохранение	Культура	Туризм	Инновации для городской среды
<i>Стандарт ISO</i>	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-	+
<i>Стандарты BSI</i>	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+
<i>Критерии Smart Cities Mission</i>	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-
<i>Критерии МСЭ и Европейской экономической комиссии ООН</i>	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	+
<i>Стандарт Минстроя России</i>	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+

По результатам проведенного анализа можно сделать вывод о том, что стандарт Минстроя России во многом схож с международными стандартами, однако является не полным, поскольку направлен на цифровизацию городского управления и городской инфраструктуры, т. е. сфер жизнедеятельности, напрямую подконтрольных органам власти и местному самоуправлению. Такой подход обеспечивает быстрое получение муниципалитетом конкурентных преимуществ от внедрения сервисов «умного города».

Помимо отсутствия концепции «умного города», национальных стандартов на текущий момент в России в силу политических, экономических и других особенностей страны существуют такие проблемы на пути к цифровизации, как:

- дефицит высококвалифицированных кадров в сфере цифровой трансформации;
- устаревшие нормативно-правовые акты в сферах обеспечения безопасности, ЖКХ, энергетике;
- несвязность взаимодействия ведомств, органов исполнительной власти, органов местного самоуправления, представителей разных отраслевых направлений, ответственных за организацию мероприятий, реализуемых в рамках проектов по цифровизации;
- отсутствие площадок для обмена лучшими практиками в области цифровизации;
- стоимость «умных» решений.

Заключение

На сегодняшний день нормативно-правовая среда, регулирующая механизмы использования «умных городов» и схемы субсидирования мероприятий по цифровизации городского хозяйства, проработана достаточно слабо. А это один из основных и первоочередных моментов в части реализации мероприятий в области цифровизации в муниципальных образованиях.

Решение обозначенных в настоящей статье проблем возможно только при наличии «единого центра управления» проектом «Умный город» в лице одного из федеральных органов власти, при этом роль такого органа власти видится в следующем:

1. Обеспечение нормативной базы для быстрой и эффективной реализации мероприятий с учетом положительного международного опыта.
2. Создание государственных систем и сервисов, общеприменимых в любом «умном городе» (по аналогии с системой межведомственного электронного взаимодействия (СМЭВ) и порталом госуслуг) с целью оптимизации затрат бюджетов Российской Федерации.

Литература

1. Аргунова, М.В. Модель «Умного» города как проявление нового технологического уклада / М.В. Аргунова // *Наука и школа*. – 2016. – № 3. – С. 14–23.
2. Умный город – концепция, технологии, перспективы развития. – <https://robo-sapiens.ru/stati/umnyiy-gorod>.
3. Умные города: модели, инструменты, рэнкинги и стандарты / В.И. Дрожжинов, В.П. Куприяновский, Д.Е. Намиот и др. // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2017. – № 3. – С. 19–48.
4. Веселова, А.О. Перспективы создания «умных городов» в России: систематизация проблем и направлений их решения / А.О. Веселова, А.Н. Хацкелевич, Л.С. Ежова // *Вестник ПГУ. Серия: Экономика*. – 2018. – № 1. – С. 75–89. DOI: 10.17072/1994-9960-2018-1-75-89
5. Куприяновский, В.П. Стандартизация Умных городов, Интернета Вещей и Больших Данных. Соображения по практическому использованию в России / В.П. Куприяновский, Д.Е. Намиот, П.В. Куприяновский // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2016. – № 2. – С. 34–40.
6. Методические рекомендации по подготовке регионального проекта «Умные города». – <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/620/Metodicheskie-rekomendatsii.docx>.
7. Базовые и дополнительные требования к умным городам (стандарт «Умный город»). – <http://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/74f/Standart.pdf>.
8. Банк решений умного города. – <https://russiasmartcity.ru>.
9. Smart cities – Vocabulary (PAS 180:2014). – <http://shop.bsigroup.com/upload/PASs/Free-Download/PAS180.pdf>.

Краткие сообщения

10. *Smart city framework – Guide to establishing strategies for smart cities and communities (PAS 181:2014)*. – https://shop.bsigroup.com/upload/Smart_cities/BSI-PAS-181-executive-summary-UK-EN.pdf.

11. *Smart city concept model – Guide to establishing a model for data interoperability (PAS 182:2014)*. – https://shop.bsigroup.com/upload/Smart_cities/BSI-PAS-182-executive-summary-UK-EN.pdf.

12. *Guide for city leaders Summary of PD 8100*. – https://shop.bsigroup.com/upload/Smart_cities/BSI-Making-cities-smarter-Guide-for-city-leaders-Summary-of-PD-8100-UK-EN.pdf.

13. *Smart cities – Guide to the role of the planning and development process (PD 8101:2014)*. – https://shop.bsigroup.com/upload/Smart_cities/BSI-PD-8101-executive-summary-UK-EN.pdf.

14. *Smart Cities Mission*. – <http://smartcities.gov.in/content>.

Макаренко Константин Викторович, канд. техн. наук, начальник Управления технического развития, Министерство информационных технологий и связи Челябинской области, г. Челябинск; makarchel@mail.ru.

Логиновская Валерия Олеговна, главный специалист отдела обеспечения функционирования информационных систем ОГБУ «Челябинский региональный центр навигационно-информационных технологий», г. Челябинск; valeria.login@yandex.ru.

Поступила в редакцию 12 мая 2019 г.

DOI: 10.14529/ctcr190316

“SMART CITY”: STANDARDS, PROBLEMS, DEVELOPMENT PROSPECTS

K.V. Makarenko¹, makarchel@mail.ru,

V.O. Loginovskaya², valeria.login@yandex.ru

¹ Ministry of Information Technologies and Communications in the Chelyabinsk Region, Chelyabinsk, Russian Federation

² Chelyabinsk Regional Center of Navigation Information Technologies, Chelyabinsk, Russian Federation

This article discusses the basic interpretations of the concept of “smart city”, describes the key international and national standards that are in force, describes the main problems of digitalization of urban economy in Russia.

Forming standards of a “smart city” in Russia is important because such standards are a guideline in planning long-term and short-term measures to digitize the urban economy. Open and universal standards accelerate and reduce the cost of development in this area.

However, to date, the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation (the Ministry of Construction of Russia) has developed basic and additional requirements for “smart cities”. A comparative analysis of the international standards of the “smart city” with the requirements developed by the Ministry of Construction of Russia is presented.

In some countries that are actively implementing programs for the development of “smart cities”, local standards are localized, taking into account local specifics, international standards. Thus, for the implementation of smart cities development programs in the Republic of Korea (the “Smart Seoul” program), standards developed by the ISO/TC 268 technical committee were localized, including ISO 37120: 2014 “Sustainable community development – indicators of urban services and quality of life”, and for the participating cities of the “One Hundred Smart Cities” program (“Smart Cities Mission”) in India, it is recommended to follow the standards set by the British Standardization Institute (BSI) when implementing the program at all levels.

The work used the development of the international organization for standardization (ISO), the British Institute of Standardization, regulatory documents prepared by the Ministry of Construction of Russia, and other studies relating to the development of “smart cities”.

Keywords: smart city, digital transformation, regulation, end-to-end technologies, standards.

References

1. Argunova M.V. [The “Smart city” Model as a Manifestation of the New Technological Mode]. *Science and School*, 2016, no. 3, pp. 14–23. (in Russ.)
2. *Umnyy gorod – kontseptsiya, tekhnologii, perspektivy razvitiya* [Smart City – Concept, Technologies, Development Prospects]. – Available at: <https://robo-sapiens.ru/stati/umnyiy-gorod>.
3. Drozhzhinov V.I., Kupriyanovskiy V.P., Namiot D.E., Sinyagov S.A., Kharitonov A.A. [Smart Cities: Models, Tools, Rankings and Standards]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2017, no. 3, pp. 19–48. (in Russ.)
4. Veselova A.O. [Prospects to Create “Smart Cities” in Russia: Classification of Problems and Their Solutions]. *Bulletin of PGU. Series: Economic*, 2018, no. 1, pp. 75–89. (in Russ.) DOI: 10.17072/1994-9960-2018-1-75-89
5. Kupriyanovskiy V.P. [On Standardization of Smart Cities, Internet of Things and Big Data. The Considerations on the Practical Use in Russia]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2016, no. 2, pp. 34–40. (in Russ.)
6. *Metodicheskie rekomendatsii po podgotovke regional'nogo proekta “Umnye goroda”* [Guidelines for the Preparation of the Regional Project “Smart Cities”]. Available at: <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/620/Metodicheskie-rekomendatsii.docx>. (in Russ.)
7. *Bazovye i dopolnitel'nye trebovaniya k umnym gorodam (standart “Umnyy gorod”)* [Basic and Additional Requirements for Smart Cities (Standard “Smart City”)]. Available at: <http://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/74f/Standart.pdf>.
8. *Bank resheniy umnogo goroda* [Smart City Solutions Bank]. Available at: <https://russiasmartcity.ru>.
9. Smart Cities – Vocabulary (PAS 180:2014). Available at: <http://shop.bsigroup.com/upload/PASs/Free-Download/PAS180.pdf>.
10. Smart City Framework – Guide to Establishing Strategies for Smart Cities and Communities (PAS 181:2014). Available at: https://shop.bsigroup.com/upload/Smart_cities/BSI-PAS-181-executive-summary-UK-EN.pdf.
11. Smart City Concept Model – Guide to Establishing a Model for Data Interoperability (PAS 182:2014). Available at: https://shop.bsigroup.com/upload/Smart_cities/BSI-PAS-182-executive-summary-UK-EN.pdf.
12. Guide for City Leaders Summary of PD 8100. Available at: https://shop.bsigroup.com/upload/Smart_cities/BSI-Making-cities-smarter-Guide-for-city-leaders-Summary-of-PD-8100-UK-EN.pdf.
13. Smart Cities – Guide to the Role of the Planning and Development Process (PD 8101:2014). Available at: https://shop.bsigroup.com/upload/Smart_cities/BSI-PD-8101-executive-summary-UK-EN.pdf.
14. Smart Cities Mission. Available at: <http://smartcities.gov.in/content>.

Received 12 May 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Макаренко, К.В. «Умный город»: стандарты, проблемы, перспективы развития / К.В. Макаренко, В.О. Логиновская // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 165–171. DOI: 10.14529/ctcr190316

FOR CITATION

Makarenko K.V., Loginovskaya V.O. “Smart City”: Standards, Problems, Development Prospects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 165–171. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190316

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 – дирекция Высшей школы электроники и компьютерных наук, отв. секретарю к.т.н., доц. Плотниковой Н.В. Адрес электронной почты ответственного секретаря журнала: plotnikovanv@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»
2019. Том 19, № 3

16+

Редактор *С.И. Уварова*
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 31.07.2019. Дата выхода в свет 09.08.2019. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 20,46. Тираж 500 экз. Заказ 337/347. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.