НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ISSN 1814-1196

№ 4 (73) **2018**

УДК 681.51(06)
Н 76

Учредитель

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Редакционная коллегия

Главный редактор

Денисов Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Заместители главного редактора

Вострецов Алексей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Лемешко Борис Юрьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Шокин Юрий Иванович, академик, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск

Ответственный секретарь

Воевода Александр Александрович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Члены редколлегии

Алаин Бриллард, д-р, проф., Университет Мюлуза, Франция
Алексеенко Сергей Владимирович, академик, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск
Алиферов Александр Иванович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Виролайнен Вели Матти, проф., Технологический университет Лаппеэнранта, Финляндия
Воронин Владимир Викторович, д-р техн. наук, доцент, ТОГУ, г. Хабаровск
Воропай Николай Иванович, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., Институт систем энергетики им. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск
Воскобойников Юрий Евгеньевич, д-р физ.-мат. наук, проф., Сибстрин, г. Новосибирск
Гайдук Анатолий Романович, д-р техн. наук, проф., ЮФУ, г. Таганрог
Гозбенко Валерий Ерофеевич, д-р техн. наук, проф., ИрГУПС, г. Иркутск
Григорьев Юрий Дмитриевич, д-р техн. наук, проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург
Зиновьев Геннадий Степанович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Крюков Андрей Васильевич, д-р техн. наук, проф., ИрГУПС, г. Иркутск
Лупи Серджио, д-р, проф., Падуанский университет, Италия
Лисицина Лилия Ивановна, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Мухопад Юрий Федорович, д-р техн. наук, проф., ИрГУПС, г. Иркутск
Наумова Елена Николаевна, д-р техн. наук, проф., Университет Тафтса, США
Неизвестный Игорь Георгиевич, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск
Нейман Владимир Юрьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Носек Ярослав, д-р техн. наук, проф., Технический университет Либерец, Чехия
Ронжин Андрей Леонидович, д-р техн. наук, проф., СПИИРАН, г. Санкт-Петербург
Рубан Анатолий Иванович, д-р техн. наук, проф., СФУ, г. Красноярск
Рылов Анатолий Игоревич, д-р физ.-мат. наук, Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, г. Новосибирск
Степанов Олег Андреевич, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург
Уранчимэг Тудевдагва, д-р техн. наук, проф., Хемницкий технический университет, Германия
Фомин Василий Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск
Хабаров Валерий Иванович, д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск
Ханова Анна Алексеевна, д-р техн. наук, проф., АГТУ, г. Астрахань
Хи Жаохуи, Харбинский университет науки и технологии, Китай
Хлебников Михаил Владимирович, д-р физ.-мат. наук, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва
Чичиндаев Александр Васильевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Шандаров Станислав Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., ТУСУР, г. Томск

Адрес редакции, издателя: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ
Тел. (383) 346-56-88, тел., факс (383) 344-49-98
E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru
Web Site: http://journals.nstu.ru/vestnik/

16+

Индекс: 82962 («РОСПЕЧАТЬ») **УДК 681.51(06)**

© Коллектив авторов, 2018
© Новосибирский государственный технический университет, 2018

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ISSN 1814-1196

№ 4 (73) **2018**

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Abdenov A.Zh., Abdenova A.A., Mukhanova A.A. Algorithms for estimating labour productivity prediction based on regression and dynamic models 7

Авдеенко Т.В., Муртазина М.Ш., Гриф М.Г. О возможностях автоматической обработки текста для построения онтологии требований 27

Basinya E.A. An automated system of network and system administration of Windows and Linux family operating systems 47

Kondratyev N.V., Kiselev D.S., Vagin D.V., Persova M.G., Soloveichik Yu.G. A study of the equivalence of influences of varying thickness and conductivity in 3D-processing of airborne electromagnetic data in complex media 59

Сивак С.А., Ступаков И.М., Кондратьева Н.С. Комбинированный векторный метод конечных и граничных элементов для задачи распространения электромагнитного поля с учетом вихревых токов 79

Харахинов В.А., Сосинская С.С. Использование сетей Петри при проектировании архитектуры программного продукта для анализа данных с помощью нейронных сетей 91

ЭНЕРГЕТИКА

Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен Ван Хуан. Моделирование режимов работы систем электроснабжения с установками распределенной генерации и мощной асинхронной нагрузкой 101

Щинников П.А., Синельников Д.С. Устойчивость оптимальных параметров теплофикационных энергоблоков при разукрупнении графиков электрических и тепловых нагрузок 115

Правила для авторов 128

Корректор *Л.Н. Киншт*
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Журнал зарегистрирован Комитетом РФ по печати. Свидетельство о регистрации
средства массовой информации ПИ № 77–1599 от 10 февраля 2000 г.
Периодичность издания – 4 номера в год.
Журнал реферирован в ВИНИТИ (http: //www.2.viniti.ru)
Лицензия ИД 04303 от 20.03.01. Подписано в печать 17.12.2018. Выход в свет 20.12.2018.
Формат 70 × 108 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экземпляров.
Уч.-изд. л. 11,55. Печатных листов 8,25. Издательский № 322. Заказ № 224.
Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

SCIENCE BULLETIN OF THE NOVOSIBIRSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

ISSN 1814-1196

№ 4 (73) **2018**

УДК 681.51(06)
Н 76

Journal was established by

Novosibirsk State Technical University

Editorial board

Chief editor

Denisov V. I., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Deputy chief editor

Vostretsov A. G., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Lemeshko B. Yu., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Shokin Yu. I., D. Sc. (Phys. & Math.), Institute of Computational Technologies, Novosibirsk, RF

Executive Secretary

Voevoda A. A., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

The members of the editorial Board

Brillard A., D. Sc. (Eng.), Universite de Haute Alsace, Mulhouse, France
Aliferov A. I., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Alekseenko S. V., D. Sc. (Phys. & Math.), Institute of Thermophysics, Novosibirsk, RF
Virolainen V. M., professor, Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, Finland
Voronin V. V., D. Sc. (Eng.), Pacific national University, Khabarovsk, RF
Voropay N. I., Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Eng.), Melentiev Energy Systems Institute, Irkutsk, RF
Voskoboinikov Yu. E., D. Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, RF
Gaiduk A. R., D. Sc. (Eng.), Southern Federal University, Taganrog, RF
Gozbenko V. E., D. Sc. (Eng.), Irkutsk State Transport University, Irkutsk, RF
Grigor'ev Yu. D., D. Sc. (Eng.), Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, RF
Zinoviev G. S., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Kryukov A. V., D. Sc. (Eng.), Irkutsk State Transport University, Irkutsk, RF
Lupi Sergio, D. Sc. (Eng.), Universita degli Studi di Padova, Padua, Italy
Lisitcina L. I., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Mukhopad Yu. F., D. Sc. (Eng.), Irkutsk State Transport University, Irkutsk, RF
Naumova E.N., PhD. (Math.), Tufts University, USA
Neizvestnyi I. G., D. Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Neiman V. Yu., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Nosek J., D. Sc. (Eng.), Technical University of Liberec, Czech Republic
Ronzhin A. L., D. Sc. (Eng.), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of sciences, Saint-Petersburg, RF
Ruban A. I., D. Sc. (Eng.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, RF
Rylov A. I., D. Sc. (Phys. & Math.), Sobolev Institute of Mathematics, Novosibirsk, RF
Stepanov O. A., D. Sc. (Eng.), ITMO University, Saint-Petersburg, RF
Uranchimeg T., D.Sc. (Eng.), Technische Universität Chemnitz, Germany
Fomin V. M., D. Sc. (Phys. & Math.), Khristianovich Institut of theoretical and applied mechanics SB RAS, Novosibirsk, RF
Khabarov V. I., D. Sc. (Eng.), Siberian Transport University, Novosibirsk, RF
Khanova A. A., D. Sc. (Eng.), Astrakhan State Technical University, Astrakhan, RF
Xi Zhaohui, Harbin University of Science and Technology, China
Khlebnikov M. V., D. Sc. (Phys. & Math.), Institute of Control Sciences, Moscow, RF
Chichindaev A. V., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Shandarov S. M., D. Sc. (Phys. & Math.), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, RF

Editorial Adress: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
Tel. (383) 346-56-88, Fax (383) 344-49-98
E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru
Web Site: http://journals.nstu.ru/vestnik/

УДК 681.51(06)

© Authors, 2018
© Novosibirsk State Technical University, 2018

SCIENCE BULLETIN OF THE NOVOSIBIRSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

ISSN 1814-1196

№ 4 (73) **2018**

CONTENTS

INFORMATICS, COMPPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Abdenov A.Zh., Abdenova A.A., Mukhanova A.A. Algorithms for estimating labour productivity prediction based on regression and dynamic models 7

Avdeenko T.V., Murtazina M.Sh., Grif M.G. On the possibilities of automatic text processing for constructing the ontology of requirements 27

Basinya E.A. An automated system of network and system administration of Windows and Linux family operating systems 47

Kondratyev N.V., Kiselev D.S., Vagin D.V., Persova M.G., Soloveichik Yu.G. A study of the equivalence of influences of varying thickness and conductivity in 3D-processing of airborne electromagnetic data in complex media 59

Siwak S.A., Stupakov I.M., Kondratieva N.S. A combined vector method of finite and boundary elements for simulating electromagnetic filed propagation considering an eddy current model 79

Kharakhinov V.A., Sosinskaya S.S. The use of Petri nets for the software product design to analyze data using neural networks 91

POWER ENGINEERING

Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen Van Khuan. Modeling of operating modes of a power supply system with distributed generation plants and a powerful asynchronous load ... 101

Shchinnikov P.A., Sinelnikov D.S. Stability of optimal parameters of CHPPs with the zoning of electrical and temperature charts 115

Rules for authors 128

Editor *L.N. Kinsht*
Computer imposition *S.I. Tkacheva*

The journal is registered by Russian Federation Committee on the press.
The certificate on registration of mass media of PI No. 77-1599 of February 10, 2000.
Publication frequency – 4 numbers a year.
Journal referenced in VINITI (http://www.2.viniti.ru)
License ID 04303 from 20.03.2001. Signed in print December 17, 2018.
Date of publication December 20, 2018. Format 70 × 108 1/16
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 11,55. Printed pages 8,25.
Publishing number 322. Order number 224.

It is printed in printing house of Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 73, № 4, 2018, с. 7–26

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 73, No. 4, 2018, pp. 7–26

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 331.1:519.24 DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-7-26

Algorithms for estimating labour productivity prediction based on regression and dynamic models*

A.ZH. ABDENOV[a], A.A. ABDENOVA[b], A.A. MUKHANOVA[c]

010000, KZ, Astana, 2, K. Satpaev Street, Eurasian National University

[a] *amirlan21@gmail.com* [b] *aliyastana@gmail.com* [c] *ayagoz198302@mail.ru*

Abstract

Gross domestic product is one of the most important indicators of the national accounts system. It characterizes the final result of productive activity of domestic economic units and measures the value of goods and services produced by these units in the country for a certain period of time for final use. The paper considers an algorithm for constructing a linear stationary model in terms of the state space for describing behaviour and predicting labour productivity state depending on the capital-labour ratio and labour costs, instead of describing the object given by the three-factor non-linear Cobb-Douglas model. In addition to a general construction of a dynamic model the algorithm includes the description of the procedures in the form of recursive formulae allowing calculation of variance magnitudes for the dynamic noise, the measuring system noise and the initial state of the investigated object behaviour on the basis of statistical time series data related to labour productivity. An example shows that the proposed model provides more efficient prediction estimates of labour productivity values compared with the prediction estimates calculated using a three-factor non-linear regression model. The numerical calculations of the accuracy of prediction estimates were made using an absolute percentage error and the Teil formula for both the three-factor Cobb-Douglas model and the model in the form of the state space. The calculations showed more accurate prediction estimates and more adequate filtering estimates for the model in terms of the state space.

Keywords: Cobb-Douglas model, three-factor model, dynamic model, state space, noise variance, Kalman filter, absolute percentage error, Teil formula

INTRODUCTION

In macroeconomic interpretation the gross domestic product (GDP) is one of the most significant indicators in the system of national accounts, it characterizes the final result of the productive activity of economic units-residents and measures the cost of goods and services produced in the country for a certain period of time by these units for the final use. The level of economic development of a country and general welfare of the nation depend on GDP.

* *Received 22 February 2018.*

However, a more qualitative and accurate measure showing the material prosperity of the citizens of any country compared to GDP is the GDP calculated per capita. Therefore, the study of GDP volume and dynamics using mathematical models is an important subject of statistical analysis.

However, a more qualitative and accurate measure showing the material prosperity of the citizens of any country compared to GDP is the GDP calculated per capita. Therefore, the study of GDP volume and dynamics using mathematical models is an important subject of statistical analysis.

For this purpose it is necessary to solve at least two problems: the first is to determine the

dependence of the GDP on the most significant factors to get a high enough adequacy with statistical data; the second is to construct efficient GDP prediction estimates which would allow predicting economic development of the country for the years to come.

For this purpose it is necessary to solve at least two problems: the first is to determine the dependence of the GDP on the most significant factors to get a high enough adequacy with statistical data; the second is to construct efficient GDP prediction estimates which would allow predicting economic development of the country for the years to come.

To solve the first problem, the significant factors are: the amount of capital assets in production and the number of employees engaged in the production. So for US manufacturing industry of 30-s the economists Ch. Cobb and P. Douglas constructed the two-factor nonlinear regression dependence for the industrial production yield [1]:

$$Y = A \cdot K^{\alpha} \cdot L^{1-\alpha}, \tag{1}$$

where Y is the industrial production yield in terms of cost; L is the number of employees engaged in production; K is the amount of capital assets used in production; A, α are the model parameters determined by statistical data.

In this case, the scale parameter A characterizes the model's degree of uncertainty from the point of view of completeness of the factors affecting an yield variable. It is noted in [1] that the alue of this parameter is close to 1, that suggests that the capital-labor ratio and the number of employees factor sufficiently accurately determine the production yield.

At the same time, the author of [1] for the purpose of decreasing the degree of uncertainty of the model (1) proposed to include in the model the new factor - the labour cost of the workers engaged in the economy. Using such factor in the model is indeed very important owing to the fact that salaries are the main incentive for employees to work. As a result, the author of [1] proposed a new formula in the form of a three-factor nonlinear regression dependency:

$$\frac{Y}{L} = A^{*}\left(\frac{K}{L}\right)^{\alpha}\left(\frac{S}{L}\right)^{\beta}, \tag{2}$$

where S is the new factor characterizing the labor cost of workers engaged in the economy; A^{*} is the new scale factor; α is the elasticity coefficient for the capital-

labor; β is the elasticity coefficient for the workers labor cost function. Other variables of expression (2) are explained above.

The author of [1] noted that formulae (1) and (2) do not always adequately reflect the true dependence of labor productivity on the capital-labor ratio and the workers' labour cost. For example, in the field of education other approaches and formulae based on other factors should be used. In this paper, we would like to mention two more drawbacks in models (1) and (2): first, these models are based on statistical data that are random, and the GDP calculations can be distorted; secondly, it is not possible to use these formulae for calculating the industrial production yield prediction estimates because of the regression formulae nonlinearity and the need for accurate calculations of predicted values for other factors included in the formulae (1) and (2).

To solve the second problem, concerning calculation of the labour productivity prediction estimate, we propose in this paper to use linear stationary models in terms of state space (SS). Therefore, the authors describe an algorithm for constructing the dynamic models in terms of SS on the basis of statistical data taking into account stochastic nature of all factors presented in the three-factor nonlinear regression model for calculation of the prediction estimates and the most reliable filtered estimates for the labour productivity.

It is practically not possible to make absolutely accurate prediction estimates for TS values. Therefore, an important task is to study the accuracy characteristics of prediction and filtered estimates for various types of models. The reliability of the chosen model to predict future TS values is assessed by periodic comparison of actual and predicted values, and by possibility of adjusting the prediction estimates for TS. The selected model type should provide the most accurate prediction estimate, as only in this case, the prediction estimate would be useful. Criteria for evaluating the accuracy of predicted TS values on the basis of different model types have to consider the predicted values scatter. The predicted values scatter is determined by the difference between the actual observed values and prediction estimates values calculated on the basis of the considered models.

Degrees of reliability and quality of TS values prediction estimates are calculated using different indicators. One of such quality indicators is the absolute percentage error (APE):

$$\mathrm{APE} = \left| \frac{x_k - \overline{x}_k}{x_k} \right| 100\ \%\,, \tag{3}$$

where x_k is the real actual TS value; $\hat{x}_k$ is the predicted TS value.

Error coefficient for the predicted estimates values as compared with the actual TS values can also be calculated using Teil formula [2]:

$$L = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} (x_k - \hat{x}_k)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} \hat{x}_k^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} x_k^2 \right]^{\frac{1}{2}}}\,. \tag{4}$$

The closer the Teil coefficient is to zero, the closer are the corresponding values in the predicted and actual TS. The calculated coefficient L proved to work for both the statistical and qualitative retrospective predictions.

1. FORMULATION OF THE PROBLEM

It is well known from scientific literature the two-factor regression relationship between the labour productivity $\frac{Y}{L}$ and the capital-labour ratio $\frac{K}{L}$ [3]. This dependence is known as Cobb-Douglas equation. The model takes into account two most important economic factors - capital assets and labour. However, the main motivation to work is the possibility to gain income in the form of remuneration of labour. Thus, the three-factor Cobb-Douglas model is considered in [1] and takes into account person and society motivation through the remuneration of labour factor. The author of paper [1] uses the following derivatives of the abovementioned economic factors: $\frac{Y}{L}$ – the labour productivity; $\frac{K}{L}$ – the capital-labour ratio with the elasticity coefficient $0 < \alpha < 1$ and for the three-factor model one more factor is added $\frac{S}{L}$ – the amount of remuneration with the elasticity coefficient $0 < \beta < 1$. As a result new nonlinear regression dependence of productivity on the capital-labor ratio and remuneration amount was derived in [1].

In practice, all annual values of the factor variables may be conveniently presented in the form of TS values. For example, paper [1] provides for annual statistical data on Y, L, K, S taken from [4]. Using these data, the author of paper [1] calculated the unknown scale factor A^*, the capital-labor ratio elasticity coefficient α, the remuneration of labour elasticity coefficient β. The following values were obtained: $A^* = 0.9911$, $\alpha = 0.5196$, $\beta = 0.5303$.

Using the equation (2) and statistical TS data on capital-labour ratio, on remuneration of labour, and the calculated values of the coefficients A^*, α, β it is possible to calculate the labour productivity prediction estimate. However, the reliability of such prediction estimate is low owing to several reasons: first, the statistical uncertainty of Y, L, K, S data is not taken into account; second, the known values for $\frac{Y}{L}$ TS variance are not used; third, there is no in the equation (2) the variable representing the labour productivity change rate which could have been a basic element enabling prediction estimate calculation for the investigated object.

Therefore, for calculation of the most reliable labour productivity prediction estimates the authors propose using a linear stationary model in terms of state space (SS).

2. ETHOD FOR CONSTRUCTING LINEAR STATIONARY MODEL IN TERMS OF SS

Let us consider a linear stationary model in terms of SS as:

$$\dot{x}(t) = a \cdot x(t) + b \cdot u(t) + c \cdot z(t) + d + w(t), \quad x(t_1) = \overline{x}_1, \tag{5}$$

$$y(t_{k+1}) = x(t_{k+1}) + v(t_{k+1}), \quad t_k \in [t_1, t_N], \quad k = 1, 2, \ldots, N, \tag{6}$$

where $\{x(t) \approx f(t) = \dfrac{Y(t)}{L(t)}, \quad u(t) = k(t) = \dfrac{K(t)}{L(t)}, \quad z(t) = s(t) = \dfrac{S(t)}{L(t)}, \quad t \in [t_1, t_N]\}$; $\{x(t_{k+1}) \approx f(t_{k+1}) = \dfrac{Y(t_{k+1})}{L(t_{k+1})}, \quad y(t_{k+1}) \approx x(t_{k+1}), \quad k = 1, 2, \ldots, N\}$; $\overline{x}_1$ is the expected mean of the initial state. To clarify the economic nature of the variables in the model (5), (6) we are going to consider below all other variables after some transformation of the three-factor model (2).

2.1. TRANSFORMATION OF THE THREE-FACTOR MODEL INTO THE MODEL IN TERMS OF SS

Let use new notations for the variables in equation (2)

$$\left\{ \frac{Y_i}{L_i} = f_i, \quad \frac{K_i}{L_i} = k_i, \quad \frac{S_i}{L_i} = s_i, \quad i = 1, 2, \ldots, N \right\}.$$

Then the equation (2) can be rewritten as:

$$f_i = A^* \cdot (k_i)^{\alpha} \cdot (s_i)^{\beta}, \quad i = 1, 2, \ldots, N. \tag{7}$$

Let us take a logarithm of both sides of (7). We obtain the following equation:

$$\log(f_i) = \log(A^*) + \alpha \log(k_i) + \beta \log(s_i), \quad i = 1, 2, \ldots, N. \tag{8}$$

Let us introduce additional notations: $ff_i = \log(f_i)$; $a = \log(A^*)$; $kk_i = \log(k_i)$; $ss_i = \log(s_i)$, $i = \overline{1, N}$.

Using the last notations the expression (8) is written as:

$$ff_i = a + \alpha \cdot kk_i + \beta \cdot ss_i, \quad i = 1, 2, \ldots, N. \tag{9}$$

The relation (9) is written in a purely deterministic form without considering the random nature of TS statistical data $\{ff_i, \quad i = 1, 2, \ldots, N\}$, $\{kk_i, i = 1, 2, \ldots, N\}$, $\{ss_i, \quad i = 1, 2, \ldots, N\}$.

In order to take into account the random nature of the labour productivity TS behaviour we will use the stationary model in terms of SS that takes into account the object dynamics noise in additive form, assuming that they are white and Gaussian, the initial conditions obey Gaussian law and that the observation noise is also white and Gaussian.

First, we introduce the notion of TS data change rate for the values of labour productivity. Let us denote the average change rate of the output values of measuring system observing behaviour of the investigated object as $\mu_{cp} \approx \frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ in the range from t_i to $t_i + \Delta t$, where $\Delta f = f(t_i + \Delta t) - f(t_i)$. Using $\{\Delta t = t_{i+1} - t_i = 1, \quad i = \overline{1, N-1}\}$ and assuming that $\{x(k_i) \approx f(k_i), \quad i = \overline{1, N}\}$ we can write the model in terms of SS taking into account stochastic effects on TS data in (5), (6):

$$\dot{x}(t) \approx \frac{x(t_{i+1}) - x(t_i)}{t_{i+1} - t_i} = a \cdot x(t) + \alpha \cdot u(t) + \beta \cdot z(t) + d + w(t), \quad x(t_1) = \overline{x}_1, \quad (10)$$

and considering that $\Delta t = 1$ the equation (10) takes the form

$$x(t_{i+1}) - x(t_i) = a \cdot x(t) + \alpha \cdot u(t) + \beta \cdot z(t) + d + w(t), \quad x(t_1) = \overline{x}_1,$$

$$x(t_{i+1}) = (1 + a) \cdot x(t_i) + b \cdot u(t_i) + c \cdot z(t_i) + d + w(t_i), \quad x(t_1) = \overline{x}_1,$$

or

$$x(t_{i+1}) = a_1 \cdot x(t_i) + b \cdot u(t_i) + c \cdot z(t_i) + d + w(t_i), \quad x(t_1) = \overline{x}_1, \quad (11)$$

$$y(t_{i+1}) = x(t_{i+1}) + v(t_{i+1}), \quad t_i \in [t_1, t_N], \quad i = 1, 2, \ldots, N, \quad (12)$$

where t_i is the discrete point in time; $x(t_i)$ is the discrete value of the investigated object state characterizing the labour productivity; $x(t_1) = \overline{x}_1$ is the initial object's state corresponding to the labour productivity expected mean at the start time point t_1 and assuming to follow Gaussian law with unknown variance $P(t_1) = P_1$; $w(t_i)$ is the white Gaussian sequence with zero mean and unknown variance Q; $\{u(t_i), i = \overline{1, N}\}$ is the first input sequence of discrete values characterizing the capital-labour ratio with the elasticity coefficient $0 < \alpha < 1$; $\{z(t_i), \overline{1, N}\}$ is the second input sequence of discrete values characterizing the remuneration of labour with the elasticity coefficient $0 < \beta < 1$; $\{y(t_i) = f(t_i), i = \overline{1, N}\}$ is the sequence of discrete values of the measuring system output; $\{v(t_i), i = \overline{1, N}\}$ is the white Gaussian sequence with zero mean and unknown variance R; a_1, α, β, d are the unknown coefficients in the dynamics model (11); N is the sampling size.

Given that all statistical TS data $\{ff_i, \quad i = 1, 2, \ldots, N\}$, $\{kk_i, i = 1, 2, \ldots, N\}$, $\{ss_i, \quad i = 1, 2, \ldots, N\}$ are random in nature we can include the aggregate randomness in the additive term of the object's dynamic noise $\{w(t_i), \quad i = 1, 2, \ldots, N-1\}$, while all unaccounted factors of the model (11) we can include in the free additive term d.

Thus, the function (2) is converted to the linear model in terms of SS, for which it is proposed to use the following algorithm for recursive calculation of all variances [5] necessary for solving equations according to the Kalman filter scheme [6], and calculation of the coefficients a_1, α, β, d in the model (11) using the least squares method (LSM).

2.2. CALCULATION OF NOISE VARIANCE ESTIMATES FOR DYNAMICS OF OBJECT AND MEASURING SYSTEM

In order to solve the problem of estimating the state and predicting the main indicator of the dynamic system, the Kalman filter scheme is used for which the model's parameters estimates as well as characteristics of the noise of the dynamics and the measuring system should be known. Therefore, in this Section, for building one-dimensional stochastic linear stationary model in terms of SS, we will consider the recursive algorithm for estimating the variances of noise of the object dynamics and the measuring system on the basis of discrete observations data of the given sampling size.

We will represent the model of the investigated object in the continuous-discrete form (5), (6). Note that the simplified differential equation, without considering the two input effects on the state of the investigated object in the ratio (5) and given the loose requirements to the accuracy of the model on a given time interval, corresponds to the following averaged differential equation:

$$\dot{\bar{x}}(t) = a \cdot \bar{x}(t), \tag{13}$$

with the initial condition

$$x(t_1) = \bar{x}_1, \quad t \in [t_1, l_N]. \tag{14}$$

The differential equation (13) can be approximated by the difference scheme

$$\bar{x}(t_{k+1}) = \mu \cdot \bar{x}(t_k). \tag{15}$$

In general, when the equation (13) on the interval is of a vector type and $\mathbf{A}$ – is the matrix of $(n \times n)$ size, then (13) can be written in the form:

$$\dot{\bar{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{A} \cdot \bar{\mathbf{x}}(t).$$

The condition for building a stable difference equation depends on stability of the matrix $\mathbf{A}$ and can be found in [7].

Let the investigated object model on the given time interval $[t_1, t_N]$ be represented by the model in terms of SS as:

$$x(t_{k+1}) = \mu \cdot x(t_k) + w(t_k), \tag{16}$$

$$x(t_1) = \bar{x}_1, \tag{17}$$

$$y(t_{k+1}) = x(t_{k+1}) + v(t_{k+1}), \quad k = \overline{0, N-1}, \tag{18}$$

where for the stability reason we assumed that $\mu = 0.97$; $x(t_k)$ – is the true value of the investigated object state, $w(t_k)$ – is the white Gaussian sequence with zero mean and unknown variance $E\left[(w(t_k)^2\right] = \sigma_w^2(t_N \mid t_N) = Q$; $y(t_k)$ – are the measuring system discrete output values; $v(t_k)$ – is the random sequence with the unknown mean $E[(v(t_k)] = q$ and the unknown variance $E\left[(v(t_k))^2\right] =$

$=\sigma^2(t_N \mid t_N)=R$; $\bar{x}(t_1)$ – is the initial state with the expected mean $\bar{x}_1$ and the unknown variance P_1.

For estimation of the mean value we form the sequence of pseudo-measurements in the following way:

$$v(t_k)^{(2)}=y(t_k)-y(t_{k-1}), \quad k=2,3,\ldots N \ . \tag{19}$$

The variables' superscripts mean the number of measurements used for the particular variable formation. Let us suppose that q has constant value. It means that the following equation can be written:

$$v(t_k)^{(2)}=q+\tilde{v}(t_k). \tag{20}$$

Then the estimate for q, assuming its constancy, is determined as follows

$$\hat{q}(t_k \mid t_k)=\hat{q}(t_{k-1} \mid t_{k-1})+\frac{1}{N(k+1)}abs\left(v(t_k)^{(2)}-\hat{q}(t_{k-1} \mid t_{k-1})\right), \quad k=\overline{2,N}, \tag{21}$$

with the initial condition $\hat{q}(t_1 \mid t_1)=0$. Finally, $q \approx \hat{q}(t_N \mid t_N)$.

One can consider the expression for discrepancy (term by P. Eickhoff [8]) of a simplified three-point filter in the form:

$$v(t_k)^{(3)}=y(t_k)-\frac{1}{2}y(t_{k-1})-\frac{1}{2}y(t_{k-2}), \quad k=3,4,\ldots N. \tag{22}$$

The mean value of the discrepancies: $E\left[v(t_k)^{(2)}\right]=q$, $E\left[v(t_k)^{(3)}\right]=\frac{3}{2}q$.

It was shown in [5, 9] that $E\left[\left(v(t_k)^{(3)}-\frac{3}{2}q\right)\left(v(t_k)^{(2)}-q\right)\right]=\frac{1}{2}\sigma_w^2$. Then the sequence for measurement of the variance σ_w^2 is determined in the following way:

$$y(t_k)^{(w)}=2\left(v(t_k)^{(3)}-\frac{3}{2}\hat{q}(t_k \mid t_k)\right)\left(v(t_k)^{(2)}-\hat{q}(t_k \mid t_k)\right), \quad k=3,4,\ldots,N, \tag{23}$$

and the estimate for the constant variance $\sigma_w{}^2$ can be calculated by the formula

$$\hat{\sigma}_w^2(t_k \mid t_k)=\hat{\sigma}_w^2(t_{k-1} \mid t_{k-1})+\frac{1}{k-1}\left(y(t_k)^{(w)}-\hat{\sigma}_w^2(t_{k-1}) \mid t_{k-1})\right), \quad k=\overline{3,N}, \tag{24}$$

with the initial condition $\hat{\sigma}_w^2(t_2 \mid t_2)=0$. Finally, $Q \approx \sigma_w^2(t_N \mid t_N)$.

It was shown in [5, 9] that $E\left[(v(t_k)^{(2)}-q)^2\right]=2\sigma^2+\sigma_w^2=2R+Q$. Thus, the sequence:

$$y(t_k)^{(v)}=\frac{1}{2}\left[\left(v(t_k)^{(2)}-\hat{q}(t_k \mid t_k)\right)^2-\hat{\sigma}_w^2(t_k \mid t_k)\right], \quad k=2,3,\ldots,N \tag{25}$$

can be considered as the variance measurements sequence for which $\sigma^2(t_N \mid t_N) = R$, in this case the estimate, under the accepted assumption on its constancy, is calculated by the recursive formula:

$$\hat{\sigma}^2(t_k \mid t_k) = \hat{\sigma}^2(t_{k-1} \mid t_{k-1}) + \frac{2}{k} abs\left(y(t_k)^{(v)} - \hat{\sigma}^2(t_{k-1} \mid t_{k-1}) \right), \quad k = \overline{2, N}, \quad (26)$$

with the initial condition $\hat{\sigma}^2(t_1 \mid t_1) = 0$. Finally, $R \approx \sigma^2(t_N \mid t_N)$.

There is left to obtain the estimates for the initial state noise $P(t_1)$. As the estimate for the initial state noise variance we can take the estimate for the object's dynamics noise variance, i. e. $P(t_1) = P(t_1 \mid t_1) = \hat{\sigma}_w^2(t_1 \mid t_1) \approx Q$.

The discrepancies coefficients of the second terms in relationships (21), (24), (26) sometimes require some correction depending on the absolute values of discrete observations.

The efficiency of the algorithm described above will be checked on the test example using a Kalman filter algorithm for the simplified model of the form (16)–(18). In this case the prediction estimates for one step $\hat{x}(t_{k+1} \mid t_k)$ can be calculated according to the following Kalman filter formulae:

$$\hat{x}(t_{k+1} \mid t_k) = \mu \cdot \hat{x}(t_k \mid t_k), \quad (27)$$

$$\hat{x}(t_1 \mid t_1) = y(t_1), \quad (28)$$

$$\hat{x}(t_{k+1} \mid t_{k+1}) = \hat{x}(t_{k+1} \mid t_k) + K(t_{k+1})(y(t_{k+1}) - \hat{x}(t_{k+1} \mid t_k)), \quad (29)$$

while the filter amplification coefficient, the variances for prediction and filtered estimates are calculated with the formulae:

$$K(t_{k+1}) = \frac{P(t_{k+1} \mid t_k)}{P(t_{k+1} \mid t_k) + \hat{\sigma}^2(t_{k+1} \mid t_{k+1})}, \quad (30)$$

$$P(t_{k+1} \mid t_k) = \mu^2 \cdot P(t_k \mid t_k) + \hat{\sigma}_w^2(t_{k+1} \mid t_{k+1}), \quad (31)$$

$$P(t_1 \mid t_1) = \hat{\sigma}_w^2(t_1 \mid t_1), \quad (32)$$

$$P(t_{k+1} \mid t_{k+1}) = (1 - K(t_{k+1}))P(t_{k+1} \mid t_k), \; k = \overline{0, N-1}. \quad (33)$$

Thus, the algorithm for estimating the noise variances of the dynamics and measuring system with subsequent application of the Kalman filtering involves the following steps:

1) formation of the simplified filter discrepancies sequences $v(t_k)^{(2)}$ and $v(t_k)^{(3)}$ according to the expressions (19) and (22);

2) estimation of the mean value of the increase of the measurements sequence terms by q according to (21);

3) construction of the centered discrepancies values products according to the formula (23);

4) estimation of the model's dynamics variance σ_w^2 according to the expression (24);

5) construction of the measuring system's noise variance discrepancies sequences according to the formula (25);

6) estimation of the measuring system's noise variance σ^2 based on (26);

7) estimation of the initial state noise variance by the equation (32);

8) construction of the considered entities in the form of the filtered estimates using the relations (27)–(33).

2.3. EXAMPLE 1. TESTING THE ALGORITHM ON TEST DATA

Let us consider the model (16)-(18). Let there be a sequence of random variables $\{w(t_k), \quad k=1,\ldots,51\}$ with the zero mean and the variance $Q=0.1$ and the parameter $\mu=0.9$. Let there be also the sequence $v(t_k)$ with the constant mean $q=0.2$ and the variance $R=0.3$. Assuming $\vec{x}(t_1)=3$ and using the generated random sequences $w(t_k)$, $v(t_k)$ together with the formulae (16), (18) we obtain the sequence $\{y(t_k), \quad k=1,\ldots,51\}$. To the obtained sequence $\{y(t_k), \quad k=1,\ldots,51\}$ we apply estimation algorithms for: the measuring system's noise expected mean, the object's state and the measuring system's noise variances, in addition we calculate the coefficient $\hat{\mu}$ using the least-squares method (LSM). The following estimates were obtained after the calculations: $q \approx 0.17$, $Q \approx 0.11$, $R \approx 0.33$, $\hat{\mu} \approx 0.89$.

The results of modeling the measuring system output, the prediction and filtered estimates, with and without considering the systematic error of the measuring system output, are represented on fig. 1 and fig. 2, correspondingly. It can be seen from the graphs that the proposed algorithm allows estimating the constant mathematical mean for the measuring system's output sequence and to monitor the state in the form of the filtered estimates.

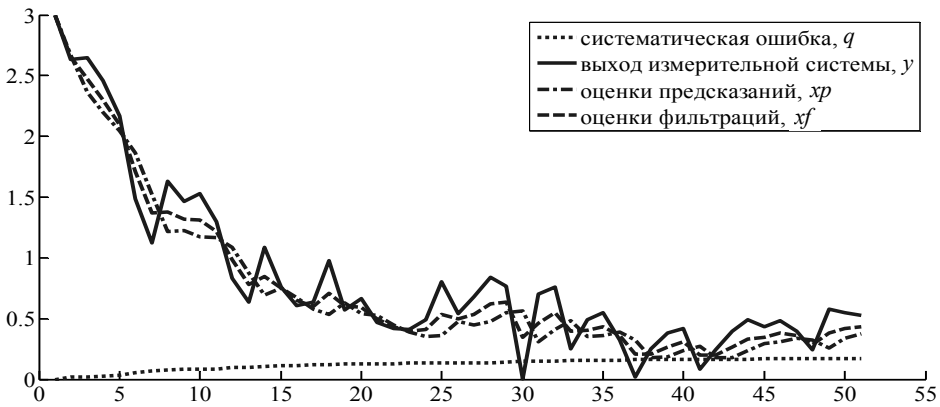

Fig. 1. The results of modeling the measuring system output, prediction and filtered estimates taking into account a systematic error of the measuring system output

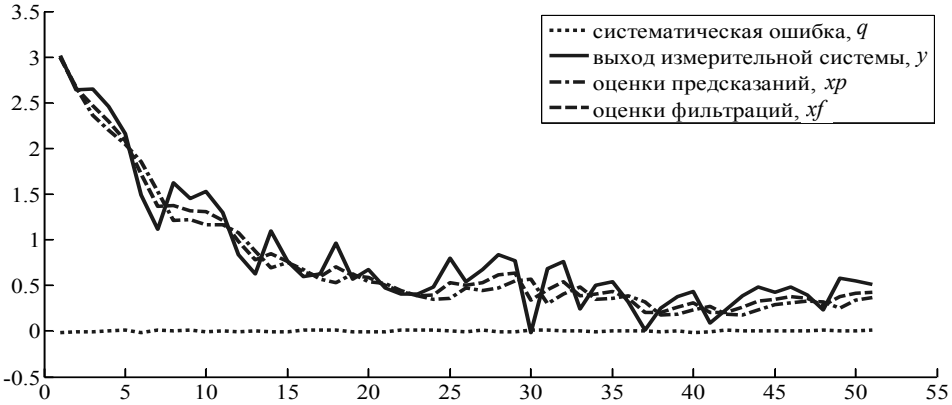

Fig. 2. The results of modeling the measuring system output, prediction and filtered estimates taking into account a systematic error of the measuring system output

Thus, in this section the recursive algorithm using the Kalman filter equations for calculation of the object's dynamics and the measuring system's noise variances is considered for the one-dimensional case. The algorithm allows calculating the variances in a recursive form based on the measuring system output data without any consideration of particular model parameters. The algorithm has been checked on the test data. In the case of a multidimensional system equations for each dimension should be considered separately.

2.4. ALGORITHM FOR CONSTRUCTING A STATIONARY MODEL IN TERMS OF SS

The algorithm for constructing the model in terms of SS consists of the following steps:

1. Let us choose one significant factor, then with respect to the factor's state space variable we consider TS sequences of two input and one output data variables $\{ff(t_i), u(t_i) = kk_i, z(t_i) = ss(t_i), i = \overline{1, N}\}$ and $\{y(t_i) = f(t_i), i = \overline{1, N}\}$, correspondingly.

2. Now, assuming that the investigated process state change depends on the time variable t, the investigated object's dynamics change rate $x(t_i)$ can be expressed as the finite-difference relation (11) taking into account initial conditions, two input factors and additive interference affecting the object's behaviour. Adding to consideration the measuring system equation (12) the model in terms of SS can be written in the form of (11) and (12).

The equations (11), (12) represent the investigated object's model in terms of SS, the model still having unknown coefficients a_1, α, β, d and the unknown variances of the dynamics noise Q, the measuring system noise R and the initial state noise $P(t_1) = P_1$. We have only two inputs, one output data and the sampling size.

3. Using the algorithm described in 3.2 it is possible using only the measuring system output sequences and the given sampling size to obtain estimates for the investigated object dynamics error variance $Q = \hat{Q}$, the measuring system error variance $R = \hat{R}$ and the initial state error variance $P(t_1) = \hat{P}_1$.

4. Assuming that $\{x(t_i) \approx y(t_i), \quad i = \overline{1,N}\}$, considering known data on the two input sequences and one output sequence, and using the LSM [3] it is possible to obtain estimates for the dynamics model coefficients (a_1, α, β, d) of the equation (11).

5. The solution to the problem of estimating the investigated object state on the basis of the Kalman filter equations [5, 6] for the model (11), (12) makes it possible to obtain the prediction estimates $\hat{x}(t_{i+1} \mid t_i)$ and the most reliable filtered estimates $\hat{x}(t_{i+1} \mid t_{i+1})$ concerning the state variable $\{x(t_{i+1}), \quad t_i \in [t_1, t_N], \ i = \overline{1,N}\}$.

Let us test the described algorithm using the data from ref. [1].

Example 2

Let the process at some interval $[t_1, t_N]$ be described by the non-linear Cobb-Douglas [1] model of the type $f = A^* \cdot k^{\alpha} \cdot s^{\beta}$ where f is the output signal, k, s are two input signals. It is required to compare accuracy characteristics of the prediction estimates obtained by the non-linear regression model (2) and the linear stochastic model in terms of SS (11), (12).

Solution. For the considered example the estimates for the model (2) coefficients were obtained with LSM for the TS data $\{f(t_i), k(t_i), \ s(t_i) \quad t_i \in [t_1, t_N], \ i = \overline{1,N}\}$. The initial observations data are brought together in Table 1.

Table 1

Macroeconomic indicators	Year				
	2000	2001	2002	2003	2004
Nominal GDP, bln., a.u. (Y_i)	7305.6	8943.6	10817.4	13243.2	17048.1
Labour force engaged in economy (L_i)	64.5	65.0	65.6	66.0	66.4
Fixed assets cost (K_i)	16.605	20241	24431	30329	32541
Average monthly salary, a.u. (S_i)	2223.4	2240.4	4360.3	5498.5	6739.5

Table 1 (*continued*)

Macroeconomic indicators	Year				
	2005	2006	2007	2008	2009
Nominal GDP, bln., a.u. (Y_i)	21625.4	26880.5	33111.4	41668.0	39064
Labour force engaged in economy (L_i)	66.8	67.2	68.0	68.5	68.7
Fixed assets cost (K_i)	38368	43823	54246	64553	66489.6
Average monthly salary, a.u. (S_i)	8554.9	10633.9	13593.4	17290.1	20748.1

They were obtained in [1] using the LSM and the data from [4] the coefficients of the three-factor Cobb-Douglas formula (2): $A^* = 0.9911$; $\alpha = 0.5196$; $\beta = 0.5303$. In this case, firstly, the coefficients values are consistent with TS data concerning the GDP, the labour force engaged in economy and the fixed assets cost but the TS data concerning the average monthly salary form the Table 1 are not

consistent with the calculated values of the coefficients. Therefore, the data that correspond to the calculated values of the coefficients were reconstructed by solving the inverse problem, putting it in more details, by recalculating the TS data on the average monthly salary using the calculated coefficients and the TS data on the GDP, the labour force engaged in economy and the fixed assets cost. The calculated TS data for the average monthly salary are represented in Table 1. Secondly, in [1] the author notes that the data in the table are of stochastic nature and the coefficients estimates are also approximate owing to their stochastic nature.

The three-factor Cobb-Douglas formula reflects relatively roughly the dependence of the labour productivity on the capital-labor ratio, the amount of labor force engaged in economy and the labour cost. And using formula (2) for the GDP (or the labour productivity) prediction leads to a rough estimate. That is why we suggest using the linear stationary models in terms of SS for calculation of prediction estimates. The model constructed in terms of SS and application of the Kalman filter scheme allow calculating more accurate prediction estimates for the labor productivity and corrected and more reliable filtered estimates for the labour productivity. It should be noted that all variables included in the model (11), (12) are interconnected and application of the Kalman equations for prediction estimates allows correcting the estimates and obtaining filtered estimates as more reliable estimates compared with the prediction estimates for labour productivity calculated using the non-linear regression model.

But in order to use the Kalman filter equations we have to know the dynamic model (11) parameters, the dynamic model variance estimate (Q), the measuring system model variance estimate (R), and the initial state variance ($P(t_1)$). Using the recursive formulae (24), (26), (32) from the paragraph 3.2 one can calculate estimates for the investigated object's dynamics error variance Q, for the measuring system error variance R and for the initial state error variance $P(t_1) = P_1$.

It should be noted that it is possible to use various model types in terms of SS. For instance, the following types can be considered:

$$x(t+1) = a_1 \cdot x(t) + b \cdot u(t) + c \cdot z(t) + w(t), \; x(1) = \overline{x}_1, \tag{34}$$

or the model of the type

$$x(t+1) = a_1 \cdot x(t) + b \cdot u(t) + c \cdot z(t) + d + w(t), \; x(1) = \overline{x}_1. \tag{35}$$

The linear stationary model in terms of SS (34) reflects the dynamics behavior depending on two input signals, although the ivestigated object's dynamics behavior is also affected by other factors too. Therefore, in our opinion, the model in terms of SS (35) more adequately describes the behaviour of the investigated object. More adequate contribution of two input factors TS values on the GDP value is reflected in the values of the weight coefficients a_1, b, c, d.

For instance, the values of the unknown coefficients in the model (34) are: $a_1 = 0.3251$; $b = 0.6419$; $c = -0.0525$. As one can see, there is no proportionality between the contributions of input factors to the investigated object's state dynamics change that is also reflected in the values of weight coefficients which are very different b and c.

The calculated using LSM values of the unknown coefficients in the model (35) are: $a_1 = 0.5021$; $b = 0.3692$; $c = 0.0186$; $d = 0.408$. In model (35) the first input signal makes significant contribution, the weight coefficient is b, the second input signal has lesser contribution, the weight coefficient is c, and contribution of the other unaccounted factors is of the order of the free parameter $d = 0.408$.. The calculated values of the variances for the model (11), (12) in terms of SS concerning the logarithms of TS data for the labour productivity, the capital-labour ratio and the labour remuneration are: $Q = 0.0078$, $R = 0.042878$, $P(t_1) = 0.0078$. The logarithms of actual TS data for the labour productivity (ff_i), the capital-labour ratio (kk_i), the labour remuneration (ss_i) are represented in Table 2, where the values are for the RF Crimean region for years 2000-2014.

Table 2

Macroeconomic indicators	Year				
	1	2	3	4	5
Labour productivity (ff_i)	4.7297	4.9243	5.1053	5.1379	5.2010
Capital-labour ratio (kk_i)	5.4518	5.6752	5.7946	5.9642	6.1015
Average monthly salary, a.u. (ss_i)	3.5940	3.7421	3.8795	4.0285	4.6998

Table 2 (*continued*)

Macroeconomic indicators	Year				
	6	7	8	9	10
Labour productivity (ff_i)	5.3180	5.4001	5.5848	5.7095	5.7720
Capital-labour ratio (kk_i)	6.1740	6.3056	6.4891	6.5977	6.7267
Average monthly salary, a.u. (ss_i)	4.9465	5.1316	5.4285	5.6220	5.6491

Table 2 (*continued*)

Macroeconomic indicators	Year				
	11	12	13	14	15
Labour productivity (ff_i)	5.9211	6.0120	6.1504	6.2145	6.2959
Capital-labour ratio (kk_i)	6.8334	6.9402	7.0749	7.1936	7.2354
Average monthly salary, a.u. (ss_i)	5.7479	5.7613	5.8874	6.0272	6.0223

Now, basing on the TS data for the all three factors and the sampling size $N = 15$ let us generate the "real" data for three future years according to the following algorithm. For the all three TS we calculate pseudo-differences (i.e. generating pseudo-numbers similar to pseudo-random numbers as an algorithm generating the sequence of numbers which are almost independent of each other and obey a given distribution law) using the formulae:

$$P_ff(i) = ff(i+1) - ff(i);$$

$$P_kk(i) = kk(i+1) - kk(i);$$

$$P_ss(i) = ss(i+1) - ss(i), \quad i = 1, 2, 3, ..., N-1.$$

Then for the obtained sequences of pseudo-differences we calculate the means: $mf = 0.1119$; $mk = 0.1274$; $ms = 0.1734$.

Then for i=1, 2, 3 using the heuristic formulae:

$$ff(i) = ff(N-4+i) + 1.2mf + 0.01 \cdot randn(1,1);$$

$$kk(i) = kk(N-4+i) + 1.2mk + 0.01 \cdot randn(1,1);$$

$$ss(i) = ss(N-4+i) + 1.2ms + 0.01 \cdot randn(1,1);$$

we generate three future values for each of the three factors ff, kk, ss.

Now everything is prepared for calculating the prediction estimates and filtered estimates using the Kalman filter equations and the model (11), (12).

The calculated predictions estimates and analyses of their quality for the three-factor non-linear regression model and the model in terms of SS are represented in Tables 3 and 4.

At first, we consider the accuracy of the labour productivity estimates based on the non-linear Cobb-Douglas model, then the same consideration for the estimates based on the linear stationary model in terms of SS. According to the model (2) the following estimates were obtained for the three future years. The estimates quality is measured by the absolute percentage error for the real and the calculated values (see Table 3).

Table 3

Predictions / Indicators	Prediction for 3 years			
	Element No. 15 ($(Y(15))$	*i*-th year	(*i*+1)-th year	(*i*+2)-th year
Real data	38 723	33 911	38 101	42 352
Predicted data	38 723	67 835	76 711	89 064
Discrepancy	0	–33 924	–38 610	–46 712
APE	0 %	≈ 101 %	≈ 101.335 %	≈ 110.295 %

Following the model (2) and using the real and predicted values the graphs of the estimates for the three future years are given in Fig. 3.

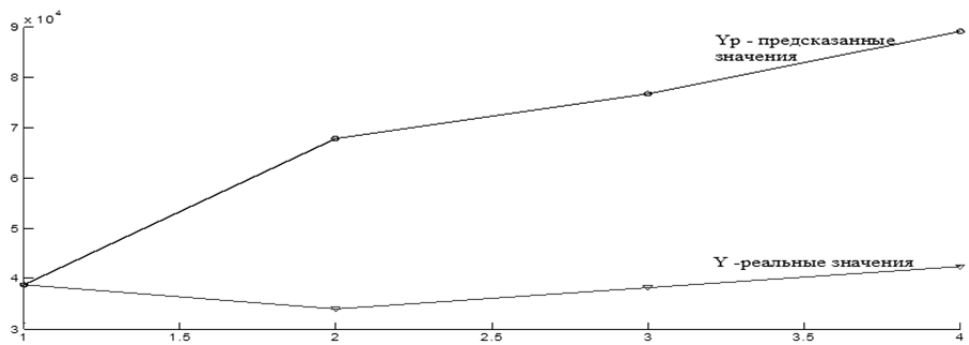

Fig. 3. Graphs based on the calculated values according to the three-factor Cobb-Douglas model:

1) $\{Y(i),\ i = 1,2,3\}$ are the real observed data; 2) $\{Y_p(i),\ i = 1,2,3\}$ are the predicted estimates for the initial conditions $Y(15) = Y_p(15)$ = 38 723

Let now consider the quality of the prediction estimates and filtered estimates calculated, using the model in terms of SS for the 15 years long TS data, for three future years. The estimates quality is measured by the absolute percentage error for the real and the calculated values. All data are presented in Table 4.

Table 4

Predictions / Indicators	Prediction for 3 years			
	$Y(15)$ – the value for the 15-th year	i-th year	(i+1)-th year	(i+2)-th year
Real data $y(t_i)$	38 723	33 911	38 101	42 352
Predicted data $\hat{x}(t_{i+1} \mid t_i)$	38 723	56 997	56 288	61 271
Discrepancy based on the estimate $\hat{x}(t_{i+1} \mid t_i)$	0	–23 086	–18 187	–18 919
APE	0	≈ 68.078 %	≈ 47.734 %	≈ 44.671 %
Filtered estimate $\hat{x}(t_{i+1} \mid t_{i+1})$	38 723	46 071	47 987	52 650
Discrepancy based on the estimate $\hat{x}(t_{i+1} \mid t_{i+1})$	0	–12 160	–9886	–10 298
APE	0 %	≈ 33.859 %	≈ 25.047 %	≈ 24.315 %

Following the model (8), (9) and using the model in terms of SS the graphs of the estimates for the three future years are pictured on the fig. 4 for: 1) $\{Y(i),\ i=1,2,3\}$ the real observed data, $\{Y_p(i),\ i=1,2,3\}$ the predicted estimates and $\{Y_f(i),\ i=1,2,3\}$ the filtered estimates.

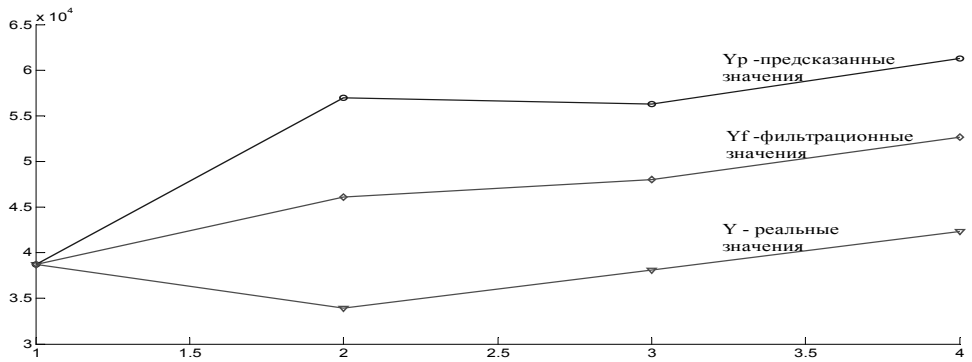

Fig. 4. Graphs based on the calculated values according to the model in terms of SS: 1) $\{Y(i),\ i=1,2,3\}$ are the real observed data; 2) $\{Y_p(i),\ i=1,2,3\}$ are the predicted estimates; 3) $\{Y_f(i),\ i=1,2,3\}$ are the filtered estimates for the initial conditions $xp(15) = xf(15) = Y(15) = 38\ 723$

We found that the TS predictions for the labour productivity obtained using the model in terms of SS are more accurate than the predictions obtained using the three-factor non-linear regression Cobb-Douglas model. The APEs for the three-factor Cobb-Douglas model are in the range from 101% to 110%, whereas the APEs for the model in terms of SS go down from 68% to 44%. The quality of the

filtered estimates as the most reliable estimate is even better, the APEs go from 33 % to 24.3 %.

The qualities of the predicted estimates were also measured using the Teil formula (4). The predicted estimates error coefficient calculated using the Cobb-Douglas formula (2) and the real TS data is $L_1 = 0.3438$.

The predicted estimates error coefficient calculated by the Teil formula (4) for the estimates obtained using the Kalman filter equations and the real data is $L_2 = 0.2091$, and the predicted estimates error coefficient calculated by the Teil formula (4) for the estimates obtained using the model in terms of SS, the Kalman filter equations and the real TS data is $L_3 = 0.1241$.

As one can see analyzing the estimates quality using the absolute percentage error and the Teil formula, the model in terms of SS provides more accurate prediction estimates and more reliable filtered estimates.

CONCLUSION

Economic science is the main tool for objective economic decision making and the quality of the decisions highly depends on the science level. There is no direct applicability of economic models in economic practice, the reasons for that were for the first time systematically described in [10]. At the same time despite the "impracticalness" of such models they strongly influence the economic way of thinking and the choice of an economic policy of an enterprise or a country.

The proposed linear stationary model in terms of SS allows calculating the industrial production yield dynamics behaviour in terms of cost as the one of the significant key economic factors, the yield being dependent on the capital-labour ratio, amount of the labour force engaged in the production and the labour costs. The model has the minimal degree of uncertainty, similar to the three-factor industrial Cobb-Douglas model, concerning unaccounted factors and high adequacy concerning the statistical data used. The model takes into account the stochastic nature of TS statistical data and the effect of each factor on the dynamics of the industrial production yield in terms of cost.

Thus, the model in terms of SS can be more efficient than the three-factor Cobb-Douglas model for predicting the goods and services production dynamics in regional and branch levels.

REFERENCES

1. Maevskii V.V., Kharin Yu.S. Robastnost' regressionnogo prognozirovaniya pri nalichii funktsional'nykh iskazhenii modeli [Robust regressive forecasting under functional distortions in a model] *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*, 2012, no. 11, pp. 118–137. (In Russian).

2. Kravtsov Yu.N. Sluchainost', determinirovannost', predskazuemost' [Accident, determinism, predictability]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Soviet Physics Uspekhi*, 1989, vol. 158, iss. 1, pp. 93–122. (In Russian).

3. Kropotov Yu.F., Ermolaev V.A., Eremenko W.T., Korasev O.E. Determining the number of parameters. *Journal of Communications and Electronics*, 2010, vol. 55, iss. 1, pp. 52–57.

4. Proskuryakov A.Yu., Belov A.A., Kropotov Yu.A. *Algoritm avtomatizirovannykh sistem ekologicheskogo monitoringa promyshlennykh proizvodstv* [Algorithm of automated systems for environmental monitoring of industrial production]. Moscow, Berlin, Direct Media Publ., 2015. 121 p.

5. Ermolaev V.A. O metodakh prognozirovaniya vremennykh ryadov i nepreryvnykh protsessov [On the methods of forecasting time series and continuous processes]. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy – Radio and telecommunication systems*, 2016, no. 2, pp. 52–63.

6. Buravlev A.I. Trekhfaktornaya proizvodstvennaya model' Kobba-Duglasa [Three-factor production model of Cobb-Douglas]. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya*, 2012, no. 3, pp. 13–19.

7. Belov A.A., Proskuryakov A.Yu. Voprosy otsenivaniya kachestva prognozirovaniya vremennykh ryadov [Issues of assessing the quality of forecasting time series]. *Metody i ustroistva peredachi i obrabotki informatsii – Methods and devices of information transmission and processing*, 2011, iss. 13, pp. 105–108.

8. Ivanilov Yu.P., Lotov A.V. *Matematicheskie modeli v ekonomike* [Mathematical models in economics]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 304 p.

9. *Rossiya v tsifrakh* [Russia in numbers]. Moscow, Rosstat Publ., 2009. 525 p.

10. Abdenova G.A. Prognozirovanie znachenii urovnya vremennogo ryada na osnove uravnenii fil'tra Kalmana [Predicting the values of the time series level based on the Kalman filter equations]. *Polzunovskii vestnik – Polzunov Bulletin*, 2010, no. 2, pp. 4–6.

11. Sinitsyn I.N. *Fil'try Kalmana i Pugacheva* [Kalman and Pugachev filters]. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., Logos Publ., 2006. 640 p.

12. Peredumov V.P. Ob ustoichivosti modelirovaniya na TsVM lineinykh dinamicheskikh sistem [On the stability of modeling on digital computers of linear dynamic systems]. *Vestnik Kievskogo politekhnicheskogo institute. Tekhnicheskaya kibernetika* [Herald Kiev Polytechnic Institute. Technical cybernetics]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1983, iss. 7, pp. 39–41.

13. Yusupova M.D. Proizvodstvennaya funktsiya Kobba-Duglasa, kak instrument analiza matematicheskikh modelei [The Cobb-Douglas production function, as a tool for analyzing mathematical models]. *Izvestiya Chechenskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta – Proceedings of the Chechen State Pedagogical University*, 2017, vol. 17, no. 4 (20), pp. 304–309.

14. Eykhoff P. *System identification: parameter and state estimation*. London, John Wiley & Sons, 1974. 555 p. (Russ. ed.: Eikhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniya: otsenivanie parametrov i sostoyaniya*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1975. 683 p.).

15. Mehra R. Identification and adaptive Kalman filtering. *Mechanics*, 1971, no. 3, pp. 34–52.

16. Brammer K., Ziffling G. *Fil'tr Kalmana–B'yusi: determinirovannoe nablyudenie i stokhasticheskaya fil'tratsiya* [Kalman–Bucy Filter: deterministic observation and stochastic filtering]. Moscow, Nauka Publ., 1982.199 p. (In Russian).

17. Kleiner G.B. Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie i ekonomicheskaya teoriya [Economic-mathematical modeling and economic theory]. *Ekonomika i matematicheskie metody – Economics and Mathematical Methods*, 2001, vol. 37, no. 3, pp. 3–25.

Abdenov Amirza Zhakenovich, professor, D. Sc (Eng.), Professor at the Information Systems Department in the L.N. Gumilyov Eurasian National University. His scientific interests cover mathematical modeling of stochastic objects behavior and information security. He is the author of 1 monograph and more than 250 scientific publications and teaching manuals. Email: amirlan21@gmail.com

Abdenova Aliya Amirzaevna, a postgraduate student at the department of mathematical and computer modeling in the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Her scientific interests include mathematical modeling of stochastic objects behavior and information security. She is the author of 7 scientific papers and teaching manuals. Email: aliyastana@gmail.com

Mukhanova Ayagoz Asanbekovna, PhD (Eng.), an acting associate professor at the Department of Information Systems in the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Her scientific interests are focused on mathematical modeling of stochastic objects behavior and information security. She is the author of 18 scientific papers and teaching manuals. E-mail: ayagoz198302@mail.ru

Абденов Амирза Жакенович, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева. Научные интересы – математическое моделирование поведения стохастических объектов и информационная безопасность. Автор 250 научных и методических работ и одной монографии. E-mail: amirlan21@gmail.com

Абденова Алия Амирзаевна, соискатель кафедры математического и компьютерного моделирования Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева. Научные интересы – математическое моделирование поведения стохастических объектов. Автор семи научно-методических работ. E-mail: aliyastana@gmail.com

Муханова Аягоз Асанбековна, кандидат технических наук, исполняющий обязанности доцента кафедры информационных систем Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева. Научные интересы – математическое моделирование поведения стохастических объектов и информационная безопасность. Автор 18 научно-методических работ. E-mail: ayagoz198302@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-7-26

Алгоритмы расчета оценок предсказаний производительности труда на основе регрессионных и динамических моделей[*]

АБДЕНОВ А.Ж.[a], *АБДЕНОВА А.А.*[b], *МУХАНОВА А.А.*[c]

010000, Казахстан, Астана, ул. Сатпаева, 2, Евразийский национальный университет

[a] *amirlan21@gmail.com* [b] *aliyastana@gmail.com* [c] *ayagoz198302@mail.ru*

Валовой внутренний продукт – один из важнейших показателей системы национальных счетов, который характеризует конечный результат производительной деятельности экономических единиц-резидентов и измеряет стоимость товаров и услуг, произведенных этими единицами внутри страны за определенный период времени для конечного использования. В статье рассматривается алгоритм построения линейной стационарной модели в форме пространства состояний для описания поведения и предсказания состояния производительности труда в зависимости от факторов фондовооруженности и величины оплаты труда работников взамен описанию объекта, которая задана в виде трехфакторной нелинейной регрессионной модели Кобба–Дугласа. В алгоритме, кроме общего построения динамической стохастической модели, содержится описание процедур в виде рекуррентных формул, позволяющих рассчитать величины дисперсий шумов динамики, шумов измерительной системы и начального состояния поведения исследуемого объекта на основе временных рядов выхода статистических данных производительности труда. На примере показано, что построенная динамическая модель дает более эффективные оценки предсказания величин производительности труда по сравнению с оценками предсказания, рассчитанными на основе трехфакторной нелинейной регрессионной модели. Приведен численный расчет качества точности оценок предсказаний, полученных с помощью трехфакторной формулы Кобба–Дугласа и модели в форме пространства состояний на основе абсолютной процентной ошибки и формулы Тейла. Расчетные данные указывают на более точные оценки предсказания и более достоверные оценки фильтрации в пользу модели в форме пространства состояний.

Ключевые слова: модель Кобба–Дугласа, трехфакторная модель, динамическая модель, пространство состояний, дисперсии шумов, фильтр Калмана, абсолютная процентная ошибка, формула Тейла

[*] *Статья получена 22 февраля 2018 г.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маевский В.В., Харин Ю.С.* Робастность регрессионного прогнозирования при наличии функциональных искажений модели // Автоматика и телемеханика. – 2012. – № 11. – С. 118–137.

2. *Кравцов Ю.Н.* Случайность, детерминированность, предсказуемость // Успехи физических наук. – 1989. – Т. 158, вып. 1. – С. 93–122.

3. Identification of models for discrete linear systems with variable, slowly varying parameters / Yu.F. Kropotov, V.A. Ermolaev, W.T. Eremenko, O.E. Korasev // Journal of Communications and Electronics. – 2010. – Vol. 55, iss. 1. – P. 52–57.

4. *Проскуряков А.Ю., Белов А.А., Кропотов Ю.А.* Алгоритм автоматизированных систем экологического мониторинга промышленных производств: монография. – М.; Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 121 с.

5. *Ермолаев В.А.* О методах прогнозирования временных рядов и непрерывных процессов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2016. – № 2. – С. 52–63.

6. *Буравлев А.И.* Трехфакторная производственная модель Кобба–Дугласа // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2012. – № 3. – С. 13–19.

7. *Белов А.А., Проскуряков А.Ю.* Вопросы оценивания качества прогнозирования временных рядов // Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2011. – Вып. 13. – С. 105–108.

8. *Иванилов Ю.П., Лотов А.В.* Математические модели в экономике. – М.: Наука, 1979. – 304 с.

9. Россия в цифрах. – М.: Росстат, 2009. – 525 с.

10. *Абденова Г.А.* Прогнозирование значений уровня временного ряда на основе уравнений фильтра Калмана // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 4–6.

11. *Синицын И.Н.* Фильтры Калмана и Пугачева. – М.: Университетская книга: Логос, 2006. – 640 с.

12. *Передумов В.П.* Об устойчивости моделирования на ЦВМ линейных динамических систем // Вестник Киевского политехнического института. – Киев: Вища школа, 1983. – Вып. 7. – С. 39–41. – (Техническая кибернетика).

13. *Юсупова М.Д.* Производственная функция Кобба–Дугласа как инструмент анализа математических моделей // Известия Чеченского государственного педагогического университета. – 2017. – Т. 17, № 4 (20). – С. 304–309.

14. *Эйкхофф П.* Основы идентификации систем управления: оценивание параметров и состояния. – М.: Мир, 1975. – 683 с.

15. *Mehra R.* Identification and adaptive Kalman filtering // Mechanics. – 1971. – N 3. – P. 34–52.

16. *Браммер К., Зиффлинг Г.* Фильтр Калмана–Бьюси: детерминированное наблюдение и стохастическая фильтрация. – М.: Наука, 1982. – 199 с.

17. *Клейнер Г.Б.* Экономико-математическое моделирование и экономическая теория // Экономика и математические методы. – 2001. – Т. 37, № 3. – С. 3–25.

For citation:

Abdenov A.Zh., Abdenova A.A., Mukhanova A.A. Algoritmy rascheta otsenok predskazanii proizvoditel'nosti truda na osnove regressionnykh i dinamicheskikh modelei [Algorithms for estimating labour productivity prediction based on regression and dynamic models]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 4 (73), pp. 7–26. doi: 10.17212/1814-1196-2018-4-7-26.

Для цитирования:

Абденов А.Ж., Абденова А.А., Муханова А.А. Алгоритмы расчета оценок предсказаний производительности труда на основе регрессионных и динамических моделей // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 4 (73). – С. 7–26. – Яз. англ. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-4-7-26.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 73, № 4, 2018, с. 27–46

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 73, No. 4, 2018, pp. 27–46

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS, COMPPUTER ENGINEERING AND CONTROL

УДК 004.85

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-27-46

О возможностях автоматической обработки текста для построения онтологии требований*

Т.В. АВДЕЕНКО[a], М.Ш. МУРТАЗИНА[b], М.Г. ГРИФ[c]

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

[a] *avdeenko@corp.nstu.ru* [b] *murtazina@corp.nstu.ru* [c] *grif@corp.nstu.ru*

Успех программного продукта зависит от того, насколько он, как инструмент решения различных задач, соответствует потребностям конечных пользователей. Именно поэтому инженерия требований как процесс, в рамках которого происходит извлечение, анализ, спецификация и валидация требований, играет ключевую роль в разработке программных продуктов. Трендами исследований последних лет в области совершенствования процесса инженерии требований являются методы работы с требованиями как с фактами из модели предметной области приложения, а также разработка моделей представления знаний о процессах спецификации требований, о типах требований и критериях качества требований. Наиболее подходящей формой представления таких знаний являются онтологии. В данной статье рассматриваются ключевые особенности онтологического подхода к инженерии требований. При этом внимание сфокусировано на возможностях представления знаний о предметной области программного продукта в форме онтологии, и особенно на исследованиях, направленных на автоматизацию данного процесса. Актуальность разработки подходов к автоматизации построения онтологий из текстов, содержащих требования, обусловливается изменчивостью требований со стороны стейкхолдеров и необходимостью быстрого сопоставления текстов требований с целью выявления концептов предметной области программного продукта и анализа соотношения концептов между собой. Основной задачей настоящей работы является изучение возможностей автоматической обработки текста на русском языке для построения онтологий требований. Рассматриваются инструменты автоматической обработки текста на русском языке, такие как ЭТАП-3, ABBYY Compreno, Texterra, Томита-парсера, RML (проект АОТ). На примере лингвистических инструментов RML и ЭТАП-3 анализируются результаты обработки текстов требований на естественном русском языке.

---

* *Статья получена 04 октября 2018 г.*

Работа поддержана грантом Министерства образования и науки РФ в рамках проектной части государственного задания, проект № 2.2327.2017/4.6 «Интеграция моделей представления знаний на основе интеллектуального анализа больших данных для поддержки принятия решений в области программной инженерии».

The work is supported by the grant of the Russian Ministry of Education and Science within the framework of the project part of the State task, project No 2.2327.2017/4.6 "Integration of Models for Representing Knowledge Based on Intellectual Analysis of Big Data to Support Decision Making in Program Engineering"

Ключевые слова: программная инженерия, инженерия требований, онтология, автоматическая обработка текста, пользовательская история, ЭТАП-3, RML, АОТ

ВВЕДЕНИЕ

В результате стремительного развития новых технологий, а также ужесточения требований со стороны заказчика разработка программного обеспечения (ПО) для производственных и непроизводственных организаций становится все более и более сложной задачей. Чтобы оставаться конкурентоспособными, ИТ-разработчики должны уметь создавать как можно более сложное ПО за меньшее время. Разработка сложного ПО должна удовлетворять большому числу пожеланий и требований различных сторон, часто конфликтующих друг с другом.

Классический жизненный цикл ПО включает такие этапы, как сбор и анализ требований, проектирование, кодирование и отладка, тестирование, эксплуатация и сопровождение. Разработка требований, известная как инженерия требований, является фундаментом всего процесса разработки ПО, определяя в конечном счете его успех. Под инженерией требований понимается процесс извлечения, оценки, спецификации, консолидации и изменения целей, функционала, свойств и ограничений, которым должно обладать разрабатываемое ПО [1]. Процесс инженерии требований может быть условно разбит на четыре этапа: извлечение, анализ, спецификация и валидация требований.

Заказчики и конечные пользователи обычно не знают, что собой представляют требования, и не умеют их формулировать. В большинстве случаев они имеют лишь некоторый образ того, как должно выглядеть ПО и какие цели они могут достигнуть с его помощью. Эта информация пользователей очень важна в инженерии требований, однако ее явно недостаточно. На начальном этапе разработки инженеры требований должны понять намерения (цели) заказчиков и конечных пользователей, в результате чего идентифицировать требования, которые обеспечат выполнение целей. Это первоначальное извлечение требований и их анализ называется «ранней инженерией требований», оказывающей большое влияние на последующий процесс. «Поздняя инженерия требований», к которой относятся спецификация и валидация требований, страдает от ошибок, допущенных при ранней инженерии.

Результат извлечения и анализа требований к программному продукту записывается в форме спецификации требования. Согласно ISO/IEC/IEEE 29148:2011, спецификация требований к программному продукту (software requirements specification) – это структурированный набор требований (функции, производительность, ограничения проектирования и атрибуты) к ПО и его внешним интерфейсам [2]. Спецификация требований является основой для разработки ПО и подготовки к тестированию. В работах [3, 4] сложность работы с требованиями названа в качестве основной причины провала проектов по разработке программного обеспечения. По мнению авторов этих работ, недостаточно хорошо выполненная спецификация требований не позволяет создать ПО, соответствующее потребностям заказчика.

Согласно публикации [5], валидация требований – это процесс, при котором: 1) множество требований является корректным, полным и конси-

стентным; 2) можно создать модель, которой удовлетворяет множество требований; 3) имеется возможность проверки того, что разработанное ПО удовлетворяет множеству требований.

Часто встречается ситуация, когда инженер не может идентифицировать достаточное количество требований для того, чтобы разрабатываемый программный продукт удовлетворял всем пожеланиям заказчика. Обычно в этом случае недостаточно и сопутствующей информации (приоритеты требований, риски, затраты, тест-кейсы), способствующей повышению качества требований. Кроме того, требования часто не связаны друг с другом. Все это ведет к отсутствию консистентности требований, а именно к противоречиям и избыточности.

В настоящее время хорошо известно [6], что отсутствующие, неполные и противоречивые требования приводят к ошибкам в проектировании, реализации и тестировании ПО и в конечном счете к несоответствующему качеству продукта. Превышение запланированного бюджета, срыв сроков реализации могут даже привести к тому, что проект будет прерван. Заказчики могут отказаться от такой системы, а конечные пользователи разочарованы в ней. В работе [7], содержащей обзор публикаций, исследующих причины провала проектов по созданию ПО, делается вывод, что «пять из восьми возможных причин провала базируются на требованиях». Таким образом, совершенствование методов работы с требованиями может существенным образом улучшить качество и безопасность конечного продукта ПО, уменьшить риск превышения сроков и запланированного бюджета, и, что важнее всего, уменьшить или даже исключить риск провала проекта.

Задача извлечения и анализа требований сходна с чрезвычайно сложной задачей извлечения знаний из экспертов при создании интеллектуальных экспертных систем как по своей исключительной важности для дальнейшего процесса, так и по своей сути. Поэтому для ее решения представляется целесообразной разработка средств автоматизированного извлечения формализованных требований из текстов требований на естественном языке на основе методологии искусственного интеллекта. Результатом применения таких методов может стать формальное представление требований в какой-либо модели представления знаний, подобное представлению элементов знаний (аксиом) в базах знаний интеллектуальных систем. Последующая валидация требований в этом случае может базироваться на использовании методов логического вывода для проверки полноты и непротиворечивости системы аксиом, отражающих формальное описание требований.

Актуальной моделью представления сложных знаний в системах искусственного интеллекта являются онтологии. Онтологии используются в инженерии знаний чаще всего для выполнения концептуального моделирования предметной области, где они интерпретируются как «явная спецификация концептуализации» [8]. Таким образом, онтология есть формальное описание объектов и их свойств, отношений, а также ограничений и правил, управляющих отношениями. Онтологии содержат явно определенные и одинаково понимаемые концепты и ограничения, представленные в машиночитаемом формате.

Инженерия требований предполагает явное описание знаний предметной области, распределенных по различным сферам, таким как опыт, функцио-

нальность, нефункциональные требования, стейкхолдеры и т. п. Необходимо сконцентрировать эти разнообразные знания в едином репозитории. Онтологии оказываются эффективной моделью представления, организации и рассуждений о сложных знаниях, какими являются спецификации требований.

Одним из первых проектов, показавших, насколько эффективны могут быть онтологии в области инженерии требований, стали исследования по созданию методологии OntoREM (Ontology-driven Requirements Engineering Methodology), которая была апробирована в компании Airbus для разработки требований к эксплуатационной пригодности воздушных судов [9]. Данные разработки стимулировали целый ряд исследований по использованию онтологического подхода к инженерии требований в целом и инженерии требований к программным продуктам в частности. Так, в работе [10] показывается, что онтологии могут применяться для представления знаний о структуре документов с требованиями, о типах требований и о предметной области программного продукта. В исследовании [11] предлагается применять OWL-онтологии для трассировки требований посредством четырех типов связей: Refines, Requires, Conflicts, and Contains. Эти связи позволяют строить правила для рассуждения о трассируемости, согласованности и полноте требований. В диссертации [12] предлагается подход к автоматизации процесса валидации и измерения знаний о требованиях к ПО. В статьях [13, 14] предлагается подход, основанный на фреймовой онтологии, которая описывает модель типов требований для проектов разработки ПО. В рамках онтологии заданы типы отношений, которые могут быть использованы для проверки свойств непротиворечивости и трассируемости. В работе [15] предлагается применение онтолого-ориентированного подхода к поддержке процесса инженерии требований в Scrum.

Трендом исследований последних лет в области совершенствования инструментария инженерии требований является разработка методов работы с требованиями как с фактами из модели предметной области приложения. Под фактом понимается «эмпирическое знание об объектах, их свойствах и ситуациях, зафиксированное в высказывании» [16, с. 208]. Представление знаний о предметной области программного продукта в виде онтологии позволяет выполнять автоматический поиск противоречий в модели требований. После построения онтологии, отражающей все множество требований на будущий программный продукт со стороны различных стейкхолдеров, проверка качества системы требований (качества спецификации) может проводиться на основе применения логического вывода к сформированной системе аксиом над концептами онтологии, записанных на языке математической логики. Однако само построение онтологии, включающее, помимо общих требований к программному продукту, специфические требования, являющиеся результатом моделирования определенной предметной области, для которой создается продукт, является чрезвычайно сложной задачей. Данная задача по сложности сопоставима с задачей извлечения знаний из экспертов при построении экспертных систем, для решения которой в настоящее время активно развиваются методы машинного обучения.

Обычно требования к ПО фиксируются в виде текстового описания, либо на естественном языке, либо на более ограниченном языке, предполагающем использование более строгого порядка слов и лексики контролируемого

языка, например, в виде пользовательской истории. Построение и актуализация онтологии предметной области ПО с учетом постоянной изменчивости бизнес-требований и требований пользователей является крайне трудоемкой работой, в этой связи активно исследуется задача автоматического построения онтологии [17, 18].

В данной работе рассматриваются основные системы автоматической обработки текста на русском языке и анализируются их возможности для построения онтологии требований. В разделе 1 проводится обзор систем автоматической обработки текста и выделяются подходящие системы, которые потенциально могут быть использованы для построения онтологии. В разделе 2 приводятся результаты обработки текстов требований на естественном русском языке системой RML и дается интерпретация результатов. В разделе 3 мы исследуем возможности обработки спецификации требований системой ЭТАП-3. В заключение авторы делают выводы о возможностях автоматизированного построения онтологии требований с использованием систем автоматической обработки текста.

1. ОБЗОР СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТЕКСТА НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

Автоматическое построение онтологии из текстов требований на естественных языках предполагает извлечение концептов (классов) онтологии, а также отношений над концептами. Применительно к терминологии компьютерной лингвистики отношения над концептами онтологии могут быть отнесены к семантическим отношениям. Отношения над концептами могут быть получены в результате семантического анализа текста, которому предшествуют графематический, морфологический и синтаксический анализ [19].

Семантика как раздел лингвистики занимается изучением значения языковых единиц. Смысл единицы русского языка зависит от ее соотношения с остальными единицами языка, от ее лексической и синтаксической сочетаемости с ними. Так, слова «грамм», «килограмм», «тонна» являются словами одного лексического уровня – единицы измерения, но различны по числовому значению. Одной из приоритетных проблем в процессе автоматической обработки текста является проблема разрешения лексической неоднозначности. В случае неправильного определения смысл может быть полностью искажен. Рассмотрим наиболее распространенные системы семантического анализа русского языка.

Многоцелевой лингвистический процессор ЭТАП-3

ЭТАП-3 (акроним от «Электротехнический автоматический перевод-3») – это система, разработанная научными сотрудниками Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича. Цель программы – это анализ и синтез текстов по модели «Смысл–Текст», созданной И.А. Мельчуком при активном участии А.К. Жолковского и Ю.Д. Апресяна. К появлению экспериментальной системы ЭТАП привели многолетние исследования под руководством академика РАН Ю.Д. Апресяна [20]. В 1974 году были созданы системы машинного перевода ЭТАП-1 (с французского на русский) и ЭТАП-2 (с английского на русский) [21]. Следующим полигоном для испытания положений модели «Смысл–Текст» стала система ЭТАП-3, которая

разрабатывается с 1980-х годов по настоящее время. Правила и словари для анализа и синтеза текстов в системе ЭТАП-3 были частично подготовлены И.А. Мельчуком. С использованием системы ЭТАП-3 к настоящему времени разработаны система машинного перевода, модуль универсального сетевого языка UNL (Universal Networking Language), компьютерный учебник лексики и в полуавтоматическом режиме размечен корпус русских текстов СинТагРус [22].

В системе ЭТАП-3 использовано 78 видов синтаксических отношений [23]. Наиболее интересными для рассмотрения являются лексические функции, которые решают задачи разрешения синтаксической омонимии, разрешения лексической неоднозначности, идиоматического перевода. Пример синтаксической омонимии – «контроль правительства». Первый смысловой вариант – правительство контролирует кого-то, второй – правительство контролируется. Процесс разрешения синтаксической омонимии заключается в определении роли слова «контроль» (осуществлять или быть под, находиться под, подвергаться). В предложении «Президент осуществляет контроль правительства» контролируется правительство. Приведем пример для второго значения: «Президент находится под контролем правительства». Система ЭТАП-3 способна также решить проблему лексической неоднозначности. В таких случаях смысл глагола определяется существительным, с которым глагол образует словосочетание. Корректное значение определяется в случае, когда глагол употреблен в контексте существительного, например: «держать слово», «держать пари», «держать экзамен». Ознакомиться с демонстрационной версией лингвистического процессора ЭТАП-3 может любой желающий на официальном сайте Лаборатории компьютерной лингвистики ИППИ РАН (http://proling.iitp.ru/ru/etap3)

Технология ABBYY Compreno

ABBYY Compreno – это система анализа и понимания текстов на естественном языке, работа которой основана на модели предметной области в форме онтологии, правилах извлечения информации и статистике сочетаемости, которая была собрана разработчиками на корпусах параллельных текстов. Работы над этой системой ведутся более 20 лет. В отличие от других подобных технологий, ABBYY Compreno выполняет полный семантико-синтаксический анализ текста, извлекает сущности, события и связи между ними.

Анализ текста система ABBYY Compreno выполняет в четыре этапа: лексико-морфологический анализ, синтаксический анализ, семантический анализ и прагматический уровень анализа. На первом этапе исходный текст разбивается на абзацы, предложения и слова. Далее для слов определяются лексемы и морфологические признаки. На втором этапе проводится полный синтаксический анализ. На третьем этапе работы системы осуществляется семантический анализ: определяются значения слов, строится семантический граф предложения на основе данных о синтаксическом разборе. Следующий этап заключается в прагматическом уровне анализа. На этом этапе текст анализируется через прагматический слой, применяются онтологии и правила для извлечения нужных объектов. Итоговый результат – это универсальное представление информации, которое позволяет структурировать контент в нужном виде с точки зрения пользователя технологии.

Основным достоинством технологии ABBYY Compreno является определение смысла многозначных слов с помощью разрешения проблемы омонимии. Анализируя текст, программа определяет омонимы и находит корректное значение, полученное в результате анализа контекста. Данное свойство позволяет существенно повышать соответствие результатов поискового запроса, а также точность выявления конкретных объектов в текстах.

ABBYY Compreno используется для анализа сложных лингвистических связей между словами. Определение подобных связей играет важную роль в поисковых и аналитических задачах анализа текста. Благодаря семантико-синтаксическому анализу система ABBYY Compreno способна учесть множество особенностей естественного языка, которые обычно создают препятствия для качественного автоматического определения отношений в текстах. К преимуществам данной технологии относятся точный анализ, быстрый запуск проекта и качественная работа с информацией на русском языке [24]. Система выпускается под коммерческой лицензией, демонстрационная версия предоставляется только по именному запросу от сотрудников компаний.

Технология Texterra

Texterra – это технология многоязычного интеллектуального анализа текста на основе методов обработки текста, которые используют знания, извлекаемые из контента пользователей. Технология Texterra обеспечивает быстрое масштабируемое решение для интеллектуального анализа текста. Технология Texterra позволяет выполнять машинную обработку естественных языков по модели аннотирования текстов, которая аналогична модели, используемой в Apache UIMA [25].

Разработка технологии Texterra была начата в 2007 году Институтом системного программирования им. В.П. Иванникова совместно с компанией Hewlett Packard. В 2010–2013 годах развитие технологии Texterra проходило в рамках сотрудничества с компанией Samsung, дальнейшее развитие Texterra связано со стартовавшим в 2012 году исследовательским проектом Talisman (Tracking And Learning Insights form Social Media ANalysis), направленным на создание технологии, способной отследить и выделить фиктивные аккаунты в социальных сетях [26, 27] .

Технология Texterra предназначена для получения знаний на основе источников, находящихся в открытом доступе, таких как «Википедия», «Викиданные» и «МедиаВики». В качестве решаемых задач с использованием данной технологии приводятся следующие: анализ отзывов пользователей социальных медиа с целью мониторинга репутации людей, организаций и товаров, семантический поиск документов и автоматическое построение предметно-специфичных баз знаний. В основе технологии Texterra лежат методы извлечения данных и методы компьютерной лингвистики. На верхнем уровне технологии Texterra находится четыре модуля: модуль лингвистического анализа, модуль базы знаний, модуль извлечения информации и модуль анализа эмоциональной окраски. Технология Texterra применяется для решения задач семантического поиска и построения баз знаний. В системе реализованы возможности распознавания именованных сущностей, привязки к понятиям базы знаний фрагментами текстов, определяющих семантику, и извлечения основных понятий из текста. Ознакомиться с возможностями технологии Texterra можно на сайте Института системного программирования им. В.П. Иванникова РАН (https://texterra.ispras.ru/)

Томита-парсер

Томита-парсер – это анализатор текста на естественном языке, который позволяет извлекать из текста факты (структурированные данные). Томита-парсер использует алгоритм GLR-парсинга. Грамматики Томита-парсера работают с цепочками. Цепочка – это одно предложение. Из цепочки выделяются подцепочки, которые, в свою очередь, интерпретируются в разбитые по полям факты. Основные компоненты парсера [28]:

- газеттир – словарь ключевых слов, используемый в процессе анализа контекстно-свободными грамматиками;
- грамматика – множество правил, записанных на языке контекстно-свободных грамматик, определяющих синтаксическую структуру выделяемых из текста цепочек;
- множество описаний типов фактов, порождаемых в результате отображения синтаксической структуры во множество линейно организованных фактов.

Томита-парсер распространяется бесплатно, но без правил грамматики. В качестве входа для извлечения данных из фразы на естественном языке используется текстовый файл в кодировке «Юникод» (UTF-8). Результаты извлечения фактов можно получить в формате XML, что удобно для их последующей обработки.

Пакет лингвистических инструментов RML

RML (акроним от «рабочее место лингвиста») – это пакет лингвистических инструментов для анализа текста на английском, русском и немецком языках. В настоящее время пакет лингвистических инструментов RML реализуется коллективом авторов под руководством А.В. Сокирко. Пакет лингвистических инструментов RML с 2010 года доступен под лицензией GNU Public Licence [29]. Разработка проекта была начата в компании «Диалинг» (г. Москва) в конце 1990-х годов. Теоретические принципы анализа текста в системе «Диалинг» были основаны на многолетних исследованиях Н.Н. Леонтьевой. В 1998 году Н.Н. Леонтьева, получив предложение о сотрудничестве от президента компании, собрала команду для разработки системы коммерческого русско-английского машинного перевода «Диалинг». В системе «Диалинг» основополагающим семантическим понятием стало понятие «семантическое отношение». Под семантическим отношением авторы системы «Диалинг» понимали некую универсальную связь, усматриваемую носителем языка в тексте. Семантическое отношение записывается как R(A,B), где R – название отношения, A – зависимый член, B – управляющий член семантического отношения [30]. Например, отношение для фразы «картина Шишкина» будет иметь вид *автор* (*Шишкин, картина*).

Проект по разработке системы «Диалинг» просуществовал до 2001 года и был закрыт как нерентабельный. После закрытия проекта «Диалинг» А.В. Сокирко вместе с единомышленниками продолжил работу над лингвистическими процессорами системы «Диалинг» [31]. С этого момент проект развивался над названием АОТ (акроним от «автоматическая обработка текста»). АОТ включает такие компоненты, как графематический, морфологический, синтаксический и семантический анализаторы. Русский морфологический словарь проекта, как и многие современные морфологические словари,

базируется на грамматическом словаре А.А. Зализняка. Морфологический словарь русского языка проекта АОТ в настоящее время, помимо самого проекта, используется как основа словарей в других лингвистических проектах, например, в проекте по созданию размеченного корпуса текстов OpenCorpora. Данный корпус доступен под лицензией CC-BY-SA [32]. В проекте OpenCorpora словарь АОТ был адаптирован для задач контроля качества разметки корпуса: произведена унификация решеток парадигм и уменьшено количество лемм-омонимов [33].

Таким образом, в этом разделе мы рассмотрели ряд инструментов автоматической обработки текста на русском языке: ЭТАП-3, ABBYY Compreno, Texterra, Томита-парсер, RML. Для дальнейшего исследования были выбраны ЭТАП-3 и RML. Выбор первого обусловлен тем, что это инструмент, который был использован для разметки русских текстов СинТагРус. Данный корпус после проверки людьми стал использоваться инструментами автоматической обработки текста, чьи алгоритмы основаны на машинном обучении. Выбор второго, в свою очередь, обусловлен тем, что данный пакет полностью находится в свободном доступе и его морфологический словарь русского языка был использован как основа морфологической разметки текстового корпуса OpenCorpora.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ RML ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СЕМАНТИЧЕСКИХ ОТНОШЕНИЙ ОНТОЛОГИИ ТРЕБОВАНИЙ

Для иллюстрации возможностей системы RML рассмотрим примеры разбора двух предложений, содержащих требования. Первое предложение записано с учетом рекомендаций, что текст документов с требованиями должен состоять из коротких и ясных предложений. Второе требование сформулировано с применением хорошо зарекомендовавшей себя в гибких методологиях разработки техники пользовательских историй.

Требование 1. *По запросу руководства диспетчер должен отправить отчет о состоянии системы.*

Требование 2. *Как инженер, я хочу видеть год постройки каждой котельной, чтобы планировать ремонтные работы.*

Для обработки этих предложений были использованы синтаксические и семантические анализаторы системы RML. На рис. 1 и 2 показаны результаты анализа поверхностного синтаксиса для *Требования 1,* а на рис. 3 и 4 – для *Требования 2*.

Из рис. 1–4 видно, что для *Требования 1*, сформулированного в форме простого предложения, была определена одна клауза (элементарное предложение, вершиной которого является глагол либо или элемент, заменяющий его). Для предложения *Требование 2,* которое представляет собой сложноподчиненное предложение, определено две клаузы. Тип вершины клаузы для предложения *Требование 1* обозначен типом «КР_ПРИЛ» (краткая форма прилагательного). Для предложения *Требование 2* вершина главной клаузы имеет тип «ГЛ_ЛИЧН» (личная форма глагола), вершина подклаузы – «ИНФ» (неопределенная форма глагола).

Рис. 1. Результаты анализа поверхностного синтаксиса предложения в виде системы составляющих, полученные на сайте aot.ru (*Требование 1*)

Fig. 1. Results of the shallow parsing of the sentence in the form of a system of components obtained on the site aot.ru (*Requirement 1*)


```
- <sent>
  - <synvar>
      <clause type="КР_ПРИЛ">По запросу руководства диспетчер должен отправить отчет о
          состоянии системы .</clause>
      <group type="ГЕНИТ_ИГ">запросу руководства</group>
      <group type="ПГ">По запросу руководства</group>
      <group type="ПРЯМ_ДОП">отправить отчет</group>
      <group type="ГЕНИТ_ИГ">состоянии системы</group>
      <group type="ПГ">о состоянии системы</group>
    </synvar>
    <rel grmchld="но,ср,рд,ед," lemmchld="РУКОВОДСТВО" grmprnt="но,мр,дт,ед," lemmprnt="ЗАПРОС"
        gramrel="но,мр,дт,ед," name="ГЕНИТ_ИГ"> запросу -> руководства </rel>
    <rel grmchld="но,мр,дт,ед," lemmchld="ЗАПРОС" grmprnt="" lemmprnt="ПО" gramrel="дт," name="ПГ">
        По -> запросу </rel>
    <rel grmchld="но,мр,вн,ед," lemmchld="ОТЧЕТ" grmprnt="дст,пе,св," lemmprnt="ОТПРАВИТЬ"
        gramrel="дст,пе,св," name="ПРЯМ_ДОП"> отправить -> отчет </rel>
    <rel grmchld="но,жр,рд,ед," lemmchld="СИСТЕМА" grmprnt="но,ср,пр,ед," lemmprnt="СОСТОЯНИЕ"
        gramrel="но,ср,пр,ед," name="ГЕНИТ_ИГ"> состоянии -> системы </rel>
    <rel grmchld="но,ср,пр,ед," lemmchld="СОСТОЯНИЕ" grmprnt="" lemmprnt="О" gramrel="пр,"
        name="ПГ"> о -> состоянии </rel>
    <rel grmchld="од,мр,им,ед," lemmchld="ДИСПЕТЧЕР" grmprnt="кач,но,од,мр,ед,"
        lemmprnt="ДОЛЖЕН" gramrel="" name="ПОДЛ"> должен -> диспетчер </rel>
  </sent>
```


Рис. 2. Синтаксический разбор предложения (*Требование 1*), выполненный системой RML

Fig. 2. The syntactic analysis of the sentence (*Requirement 1*) made by the RML system

Рис. 3. Результаты анализа поверхностного синтаксиса в виде системы составляющих, полученные на сайте aot.ru (*Требование 2*)

Fig. 3. Results of the shallow parsing of the sentence in the form of a system of components obtained on the site aot.ru (*Requirement 2*)

Результаты синтаксического разбора передаются семантическому анализатору, который строит семантическую структуру каждого поданного на вход предложения. Семантическая структура состоит из семантических узлов и семантических отношений. Под семантическим узлом понимается «объект текстовой семантики, у которого заполнены все валентности, как эксплицитно выраженные в тексте, так и имплицитные – те, которые получаются из экстралингвистических источников» [31]. При анализе для каждой «жесткой группы»

или одиночного слова создается узел с морфологическими характеристиками. Предлоги становятся атрибутами узлов, которыми они управляли. Далее анализируются выделенные синтаксические отношения. Подробно с процедурой анализа можно ознакомиться на официальном сайте проекта АОТ на странице «Первичный семантический анализ» (http://www.aot.ru/docs/seman.html).

```
- <sent>
  - <synvar>
      <clause type="ИНФ">, чтобы планировать ремонтные работы .</clause>
      <group type="ПРИЛ_СУЩ">ремонтные работы</group>
      <group type="ПРЯМ_ДОП">планировать ремонтные работы</group>
    </synvar>
  - <synvar>
      <clause type="ГЛ_ЛИЧН">Как инженер , я хочу видеть год постройки каждой котельной ,
          чтобы планировать ремонтные работы .</clause>
      <group type="ГЕНИТ_ИГ">год постройки</group>
      <group type="ПРЯМ_ДОП">видеть год постройки</group>
      <group type="ПЕР_ГЛАГ_ИНФ">хочу видеть год постройки</group>
      <group type="ПРИЛ_СУЩ">каждой котельной</group>
    </synvar>
    <rel grmchld="кач,но,вн,мн," lemmchld="РЕМОНТНЫЙ" grmprnt="но,жр,вн,мн,"
        lemmprnt="РАБОТА" gramrel="вн,мн," name="ПРИЛ_СУЩ"> работы -> ремонтные </rel>
    <rel grmchld="но,жр,вн,мн," lemmchld="РАБОТА" grmprnt="дст,пе,нс," lemmprnt="ПЛАНИРОВАТЬ"
        gramrel="дст,пе,нс," name="ПРЯМ_ДОП"> планировать -> работы </rel>
    <rel grmchld="но,од,жр,пр,тв,дт,рд,ед," lemmchld="КАЖДЫЙ" grmprnt="но,жр,пр,тв,дт,рд,ед,"
        lemmprnt="КОТЕЛЬНАЯ" gramrel="жр,пр,тв,дт,рд,ед," name="ПРИЛ_СУЩ"> котельной ->
        каждой </rel>
    <rel grmchld="дст,пе,нс," lemmchld="ВИДЕТЬ" grmprnt="дст,пе,нс,1л,нст,ед," lemmprnt="ХОТЕТЬ"
        gramrel="дст,пе,нс,1л,нст,ед," name="ПЕР_ГЛАГ_ИНФ"> хочу -> видеть </rel>
    <rel grmchld="но,жр,рд,ед," lemmchld="ПОСТРОЙКА" grmprnt="но,мр,вн,ед," lemmprnt="ГОД"
        gramrel="но,мр,вн,ед," name="ГЕНИТ_ИГ"> год -> постройки </rel>
    <rel grmchld="но,мр,вн,ед," lemmchld="ГОД" grmprnt="дст,пе,нс," lemmprnt="ВИДЕТЬ"
        gramrel="дст,пе,нс," name="ПРЯМ_ДОП"> видеть -> год </rel>
    <rel grmchld="1л,им,ед," lemmchld="Я" grmprnt="дст,пе,нс,1л,нст,ед," lemmprnt="ХОТЕТЬ"
        gramrel="" name="ПОДЛ"> хочу -> я </rel>
    <rel grmchld="дст,пе,нс," lemmchld="ПЛАНИРОВАТЬ" grmprnt="дст,пе,нс,1л,нст,ед,"
        lemmprnt="ХОТЕТЬ" gramrel="" name="ПОДКЛАУЗА"> хочу -> планировать </rel>
  </sent>
```

Рис. 4. Синтаксический разбор предложения (*Требование 2*), выполненный системой RML

Fig. 4. The syntactic analysis of the sentence (*Requirement 2*) made by the RML system

Результаты работы семантического анализатора для предложений *Требование 1* и *Требование 2* представлены на рис. 5 и 6.

```
Nodes:
  Node 0 По ЗАПРОСУ: ЗАПРОС С л но,мр,дт,ед, -> С л но,мр,дт,ед,
  Node 1 РУКОВОДСТВА: РУКОВОДСТВО С л но,ср,рд,ед, -> С л но,ср,рд,ед,
  Node 2 ДИСПЕТЧЕР: ДИСПЕТЧЕР С л од,мр,им,ед, -> С л од,мр,им,ед,
  Node 3 ДОЛЖЕН: ДОЛЖЕН КР_ПРИЛ  кач,но,од,нст,мр,ед, -> КР_ПРИЛ  кач,но,од,нст,мр,ед,
  Node 4 ОТПРАВИТЬ: ОТПРАВИТЬ ИНФИНИТИВ  дст,пе,св, -> ИНФИНИТИВ  дст,пе,св,
  Node 5 ОТЧЕТ: ОТЧЕТ С л но,мр,вн,ед, -> С л но,мр,вн,ед,
  Node 6 о СОСТОЯНИИ: СОСТОЯНИЕ С л но,ср,пр,ед, -> С л но,ср,пр,ед,
  Node 7 СИСТЕМЫ: СИСТЕМА С л но,жр,рд,ед, -> С л но,жр,рд,ед,
Relations:
  SUB (ДИСПЕТЧЕР, ДОЛЖЕН) = подл (2, 3)
  CONTEN (ОТПРАВИТЬ, ДОЛЖЕН) = п_доп (4, 3)
  OBJ (ОТЧЕТ, ОТПРАВИТЬ) = п_доп (5, 4)
  THEME (СОСТОЯНИИ, ОТЧЕТ) = к_доп (6, 5)
  ACT (СИСТЕМЫ, СОСТОЯНИИ) = к_доп (7, 6)
  LOK (ЗАПРОСУ, ДОЛЖЕН) = X! (0, 3)
  AGENT (РУКОВОДСТВА, ЗАПРОСУ) = к_доп (1, 0)
  SUB (ДИСПЕТЧЕР, ОТПРАВИТЬ) =  (2, 4)
Aux Relations:
  SUB (ДИСПЕТЧЕР, ОТПРАВИТЬ) =  (2, 4)
```

Рис. 5. Семантические отношения в предложении (*Требование 1*), выявленные системой RML

Fig. 5. Semantic relations in a sentence (*Requirement 1*) detected by the RML system

```
Nodes:
  Node 0 КАК: КАК Н ст вопр, -> Н ст вопр,
  Node 1 ИНЖЕНЕР: ИНЖЕНЕР С л од,мр,им,ед, -> С л од,мр,им,ед,
  Node 2 Я: Я МС  1л,им,ед, -> МС  1л,им,ед,
  Node 3 ХОЧУ: ХОТЕТЬ Г  дст,пе,нс,1л,нст,ед, -> Г  дст,пе,нс,1л,нст,ед,
  Node 4 ВИДЕТЬ: ВИДЕТЬ ИНФИНИТИВ  дст,пе,нс, -> ИНФИНИТИВ  дст,пе,нс,
  Node 5 ГОД: ГОД С л но,мр,вн,ед, -> С л но,мр,вн,ед,
  Node 6 ПОСТРОЙКИ: ПОСТРОЙКА С л но,жр,рд,ед, -> С л но,жр,рд,ед,
  Node 7 КАЖДОЙ: КАЖДЫЙ МС-П т но,од,жр,пр,тв,дт,рд,ед, -> МС-П т но,жр,пр,тв,дт,рд,ед,
  Node 8 КОТЕЛЬНОЙ: КОТЕЛЬНАЯ С л но,жр,пр,тв,дт,рд,ед, -> С л но,жр,рд,ед,
  Node 9 ЧТОБЫ: ЧТОБЫ СОЮЗ зг  -> СОЮЗ зг
  Node 10 ПЛАНИРОВАТЬ: ПЛАНИРОВАТЬ ИНФИНИТИВ  дст,пе,нс, -> ИНФИНИТИВ  дст,пе,нс,
  Node 11 РЕМОНТНЫЕ: РЕМОНТНЫЙ П  кач,но,вн,мн, -> П  кач,но,вн,мн,
  Node 12 РАБОТЫ: РАБОТА С л но,жр,вн,мн, -> С л но,жр,вн,мн,
Relations:
  SUB (Я, ХОЧУ) = подл (2, 3)
  CONTEN (ВИДЕТЬ, ХОЧУ) = к_доп (4, 3)
  BELNG (ПОСТРОЙКИ, КОТЕЛЬНОЙ) = к_доп (6, 8)
  PROPERT (КАЖДОЙ, КОТЕЛЬНОЙ) = ПРИЛ_СУЩ (7, 8)
  METHOD (КАК, ХОЧУ) = Х! (0, 3)
  CONTEN (ГОД, ВИДЕТЬ) = п_доп (5, 4)
  OBJ (РАБОТЫ, ПЛАНИРОВАТЬ) = п_доп (12, 10)
  PURP (РЕМОНТНЫЕ, РАБОТЫ) = ПРИЛ_СУЩ (11, 12)
  SUB (Я, ВИДЕТЬ) =  (2, 4)
Aux Relations:
  SUB (Я, ВИДЕТЬ) =  (2, 4)
```

Рис. 6. Семантические отношения в предложении (*Требование 2*), выявленные системой RML

Fig. 6. Semantic relations in the sentence (*Requirement 2*) detected by the RML system

Из данных на рис. 6 видно, что для части узлов семантические отношения не выделяются. Например, не определено отношение для узла «ИНЖЕНЕР». По результатам проведенных разборов предложений можно отметить, что чем сложнее структура предложения и чем больше в предложении знаков пунктуации, тем меньше выявляется семантических отношений. Рассмотрим результаты, полученные для требования, выраженного предложением с несколькими однородными членами.

Требование 3. *Информация о котельной включает идентификатор котельной (ID), год постройки, средний расход угля, средний расход электроэнергии, средний расход холодной воды, температуру подачи горячей воды*.

В предложении *Требование 3* выделено всего четыре семантических отношения (рис. 7).

```
Nodes:
  Node 0 ИНФОРМАЦИЯ: ИНФОРМАЦИЯ С л но,жр,им,ед, -> С л но,жр,им,ед,
  Node 1 о КОТЕЛЬНОЙ: КОТЕЛЬНАЯ С л но,жр,пр,ед, -> С л но,жр,пр,ед,
  Node 2 ВКЛЮЧАЕТ: ВКЛЮЧАТЬ Г  дст,пе,нс,3л,нст,ед, -> Г  дст,пе,нс,3л,нст,ед,
  Node 3 ИДЕНТИФИКАТОР: ИДЕНТИФИКАТОР С л но,мр,вн,ед, -> С л но,мр,вн,ед,
  Node 4 КОТЕЛЬНОЙ: КОТЕЛЬНАЯ С л но,жр,рд,ед, -> С л но,жр,рд,ед,
  Node 5 ID: ID С л но,зв,пр,тв,вн,дт,рд,им, -> С л но,зв,пр,тв,вн,дт,рд,им,
  Node 6 ГОД: ГОД С л но,мр,вн,им,ед, -> С л но,мр,вн,им,ед,
  Node 7 ПОСТРОЙКИ: ПОСТРОЙКА С л но,жр,рд,ед, -> С л но,жр,рд,ед,
  Node 8 СРЕДНИЙ: СРЕДНИЙ П  но,од,мр,вн,им,ед, -> П  но,од,мр,вн,им,ед,
  Node 9 РАСХОД: РАСХОД С л но,мр,вн,им,ед, -> С л но,мр,вн,им,ед,
  Node 10 УГЛЯ: УГОЛЬ С л но,мр,рд,ед, -> С л но,мр,рд,ед,
  Node 11 СРЕДНИЙ: СРЕДНИЙ П  но,од,мр,вн,им,ед, -> П  но,од,мр,вн,им,ед,
  Node 12 РАСХОД: РАСХОД С л но,мр,вн,им,ед, -> С л но,мр,вн,им,ед,
  Node 13 ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ: ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ С л но,жр,рд,ед, -> С л но,жр,рд,ед,
  Node 14 СРЕДНИЙ: СРЕДНИЙ П  но,од,мр,вн,им,ед, -> П  но,од,мр,вн,им,ед,
  Node 15 РАСХОД: РАСХОД С л но,мр,вн,им,ед, -> С л но,мр,вн,им,ед,
  Node 16 ХОЛОДНОЙ: ХОЛОДНЫЙ П  кач,но,од,жр,пр,тв,дт,рд,ед, -> П  кач,но,од,жр,пр,тв,дт,рд,ед,
  Node 17 ВОДЫ: ВОД С л но,мр,вн,им,мн, -> С л но,мр,вн,им,мн,
  Node 18 ТЕМПЕРАТУРУ: ТЕМПЕРАТУРА С л но,жр,вн,ед, -> С л но,жр,вн,ед,
  Node 19 ПОДАЧИ: ПОДАЧА С л но,жр,рд,ед, -> С л но,жр,рд,ед,
  Node 20 МЦА: ГОРЯЧЕЙ: ГОРЯЧИЙ П  кач,сравн,но,од,жр,рд,ед, -> П  кач,сравн,но,од,жр,рд,ед,
  Node 21 ВОДЫ: ВОДА С л но,жр,рд,ед, -> С л но,жр,рд,ед,
Relations:
  PROPERT (СРЕДНИЙ, РАСХОД) = ПРИЛ_СУЩ (8, 9)
  PROPERT (СРЕДНИЙ, РАСХОД) = ПРИЛ_СУЩ (11, 12)
  PROPERT (СРЕДНИЙ, РАСХОД) = ПРИЛ_СУЩ (14, 15)
  PROPERT (МЦА: ГОРЯЧЕЙ, ВОДЫ) = ПРИЛ_СУЩ (20, 21)
```

Рис. 7. Семантические отношения в предложении (*Требование 3*), выявленные системой RML

Fig. 7. Semantic relations in the sentence (Requirement 3) detected by the RML system

Таким образом, можно заключить, что для целей извлечения семантических отношений для онтологии требований рассматриваемый программный инструментарий подходит лишь частично, так как он может пропускать значимые понятия. При использовании системы RML потребуется добавлять дополнительные правила обработки токенов, чтобы не потерять значимые понятия и отношения, а также дополнительные правила обработки результатов синтаксического анализа, чтобы выявить отношения «пропущенных» значимых понятий.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМЫ ЭТАП-3 ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СЕМАНТИЧЕСКИХ ОТНОШЕНИЙ ОНТОЛОГИИ ТРЕБОВАНИЙ

Рассмотрим возможности системы ЭТАП-3 при разборе предложений *Требование 1* и *Требование 2*, которые приведены на рис. 8 и 9.


```
- <S>
    <W LINK="обст" LEMMA="ПО" ID="1" FEAT="PR" DOM="5">По</W>
    <W LINK="предл" LEMMA="ЗАПРОС" ID="2" FEAT="S ЕД МУЖ ДАТ НЕОД" DOM="1">запросу</W>
    <W LINK="квазиагент" LEMMA="РУКОВОДСТВО" ID="3" FEAT="S ЕД СРЕД РОД НЕОД" DOM="2">руководства</W>
    <W LINK="предик" LEMMA="ДИСПЕТЧЕР" ID="4" FEAT="S ЕД МУЖ ИМ ОД" DOM="5">диспетчер</W>
    <W LEMMA="ДОЛЖЕН" ID="5" FEAT="A КР ЕД МУЖ" DOM="_root">должен</W>
    <W LINK="1-компл" LEMMA="ОТПРАВЛЯТЬ" ID="6" FEAT="V СОВ ИНФ" DOM="5">отправить</W>
    <W LINK="1-компл" LEMMA="ОТЧЕТ" ID="7" FEAT="S ЕД МУЖ ВИН НЕОД" DOM="6">отчет</W>
    <W LINK="1-компл" LEMMA="О" ID="8" FEAT="PR" DOM="7">о</W>
    <W LINK="предл" LEMMA="СОСТОЯНИЕ" ID="9" FEAT="S ЕД СРЕД ПР НЕОД" DOM="8">состоянии</W>
    <W LINK="квазиагент" LEMMA="СИСТЕМА" ID="10" FEAT="S ЕД ЖЕН РОД НЕОД" DOM="9">системы</W>
    .
    <LF LFVAL="1" LFFUNC="_ADV2-UN" LFARG="2"/>
  </S>
```


Рис. 8. Разбор синтаксической структуры предложения (*Требование 1*), выполненный системой ЭТАП-3

Fig. 8. Analysis of the syntactic structure of the sentence (*Requirement 1*) made by the ETAP-3 system


```
- <S>
    <W LINK="сравнит" LEMMA="КАК" ID="1" FEAT="CONJ" DOM="3">Как</W>
    <W LINK="сравн-союзн" LEMMA="ИНЖЕНЕР" ID="2" FEAT="S ЕД МУЖ ИМ ОД" DOM="1">инженер</W>
    ,
    <W LINK="предик" LEMMA="Я" ID="3" FEAT="S ЕД МУЖ ИМ ОД" DOM="4">я</W>
    <W LEMMA="ХОТЕТЬ" ID="4" FEAT="V НЕСОВ ИЗЪЯВ НЕПРОШ ЕД 1-Л" DOM="_root">хочу</W>
    <W LINK="1-компл" LEMMA="ВИДЕТЬ" ID="5" FEAT="V НЕСОВ ИНФ" DOM="4">видеть</W>
    <W LINK="1-компл" LEMMA="ГОД" ID="6" FEAT="S ЕД МУЖ ВИН НЕОД" DOM="5">год</W>
    <W LINK="квазиагент" LEMMA="ПОСТРОЙКА" ID="7" FEAT="S ЕД ЖЕН РОД НЕОД" DOM="6">постройки</W>
    <W LINK="опред" LEMMA="КАЖДЫЙ" ID="8" FEAT="A ЕД ЖЕН РОД" DOM="9">каждой</W>
    <W LINK="1-компл" LEMMA="КОТЕЛЬНАЯ" ID="9" FEAT="S ЕД ЖЕН РОД НЕОД" DOM="7">котельной</W>
    ,
    <W LINK="обст" LEMMA="ЧТОБЫ" ID="10" FEAT="CONJ" DOM="5">чтобы</W>
    <W LINK="инф-союзн" LEMMA="ПЛАНИРОВАТЬ" ID="11" FEAT="V НЕСОВ ИНФ" DOM="10">планировать</W>
    <W LINK="опред" LEMMA="РЕМОНТНЫЙ" ID="12" FEAT="A МН ВИН НЕОД" DOM="13">ремонтные</W>
    <W LINK="1-компл" LEMMA="РАБОТА" ID="13" FEAT="S МН ЖЕН ВИН НЕОД" DOM="11">работы</W>
    .
  </S>
```


Рис. 9. Разбор синтаксической структуры предложения (*Требование 2*), выполненный системой ЭТАП-3

Fig. 9. Analysis of the syntactic structure of the sentence (*Requirement 2*) made by the ETAP-3 system

В результате, который возвращает система ЭТАП-3, сохраняется порядок слов в предложении. Система ЭТАП-3 строит дерево зависимостей, уз-

лами которого являются слова предложения, а ветвями – имена синтаксических отношений. Благодаря наличию большого числа типов синтаксических отношений предложение любой сложности может быть представлено в виде дерева зависимостей, некоторые из них встречаются достаточно редко. В частности, в проанализированном фрагменте спецификации требований было выявлено 23 типа синтаксических отношений. Таким образом, можно заключить, что для целей извлечения семантических отношений для онтологии требований результаты обработки текста применимы при разработке системы правил конвертации токенов и синтаксических отношений в классы и свойства онтологии.

Таким образом, можно заключить, что в качестве входных данных для построения онтологии по текстам требований более подходят результаты, полученные с помощью системы ЭТАП-3. Результат ее включает семантические роли в синтаксических отношениях, он более очевиден и предсказуем, а это облегчит задачу разработки набора продукционных правил для обработки результатов работы парсера, особенно если в правилах обработки результатов требований учитывать фиксированную структуру требования (например, в виде пользовательской истории). Такой подход, возможно, позволит получить результаты достаточно высокого качества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были исследованы возможности автоматической обработки текста на русском языке для целей инженерии требований. Методы, лежащие в основе инструментов автоматической обработки текста, делятся на две группы: основанные на правилах и основанные на машинном обучении. Работа инструментов первой группы основывается на контекстно-свободной грамматике и расширяющих ее теориях с целью описать такие явления, как эллипсис (намеренный пропуск слов) или разрывные именные группы. Подходы, основанные на правилах, предполагают создание набора правил, отражающих все возможные грамматические зависимости. В рамках данной работы были детально изучены два основных представителя лингвистического анализатора, использующих для анализа правила грамматического разбора. На практике предусмотреть все ситуации не представляется возможным, поэтому возможны ситуации, когда лингвистический парсер первой группы для некоторых слов предложения не выдаст никого результата, что мы и пронаблюдали при анализе текстов требований в системе RML.

Инструменты второй группы обучаются на размеченном корпусе текстов, поэтому не требуют ручного написания правил грамматики. На основе данных о выявленных закономерностях в обучающей выборке такие инструменты обрабатывают новые тексты. Корпус может подготавливаться вручную или полуавтоматически, как это было сделано с корпусом СинТагРус при помощи системы ЭТАП-3. Разметка текстового корпуса даже в полуавтоматическом режиме требует значительных трудозатрат, поэтому исторически первыми появились подходы, основанные на правилах. В настоящее время уже проделана огромная работа по созданию размеченных корпусов. Поэтому инструменты, основанные на машинном обучении, начинают выходить на первый план. К числу наиболее эффективных парсеров второй

группы относится универсальный языконезависимый инструмент для работы с деревьями зависимостей MaltParser. Модель русского языка для MaltParser обучена на корпусе СинТагРус, который, в свою очередь, был подготовлен с использованием системы ЭТАП-3. В связи с вышеперечисленным и легкостью применения самого MaltParser он также может быть использован для получения исходных данных для построения онтологии требований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lamsweerde A.* Reasoning about alternative requirements options // Conceptual modeling: foundations and applications. – Berlin: Springer, 2009. – P. 380–397. – (Lecture notes in computer science; vol. 5600). – doi: 10.1007/978-3-642-02463-4_20.

2. ISO/IEC/IEEE 29148:2011. Systems and software engineering. Life cycle processes. Requirements engineering. – [S. l.]: IEEE, 2011. – 83 p.

3. *Leffingwell D., Widrig D.* Managing software requirements: a use case approach. – Boston: Addison-Wesley, 2003. – 544 p.

4. *Wiegers K., Beatty J.* Software requirements. – 3rd ed. – Redmond, WA: Microsoft Press, 2013. – 637 p.

5. *Bahill A.T., Henderson S.J.* Requirements development, verification, and validation exhibited in famous failures // Systems Engineering. – 2005. – Vol. 8, N 1. – P. 1–14. – doi: 10.1002/sys.20017.

6. *Kott A., Peasant J.* Representation and management of requirements: the RAPID-WS Project // Concurrent Engineering. – 2005. – Vol. 3, N 2. – P. 93–106. – doi: 10.1177/1063293X9500300203.

7. *Alexander I., Stevens R.* Writing better requirements. – Boston: Addison-Wesley, 2002. – 159 p.

8. *Gruber T.R.* A translation approach to portable ontology specifications // Knowledge Acquisition. – 1993. – Vol. 5. – P. 199–220. – doi: 10.1006/knac.1993.1008.

9. Ontology-driven requirements engineering: building the OntoREM meta model / M. Kossmann, R. Wong, M. Odeh, A. Gillies // Proceedings of the 3rd International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications. – Damascus, Syria, 2008. – P. 1–6. – doi: 10.1109/ICTTA.2008.4530315.

10. The use of ontologies in requirements engineering / V. Castañeda, L. Ballejos, M.L. Caliusco, M.R. Galli // Global Journal of Research in Engineering. – 2010. – Vol. 10, iss. 6. – P. 2–8.

11. *Goknil A., Kurtev I., Berg K. van den*. A metamodeling approach for reasoning about requirements // Model Driven Architecture – Foundations and Applications: 4th European Conference, ECMDA-FA 2008, Berlin, Germany, June 9–13, 2008: proceedings. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2008. – P. 310–325.

12. *Siegemund K.* Contributions to ontology-driven requirements engineering: diss. to obtain the academic degree Doctoral engineer (Dr.-Ing.). – Dresden: Technischen Universität Dresden, 2014. – 236 p.

13. *Пустовалова Н.В., Авдеенко Т.В.* Построение согласованной модели требований для процесса программной инженерии // Труды СПИИРАН. – 2016. – Вып. 1 (44). – С. 31–49. – doi: 10.15622/sp.44.3.

14. *Avdeenko T.V., Pustovalova N.V.* The ontology-based approach to support the requirements engineering process // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2016): proceedings, Novosibirsk, 3–6 October 2016. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – Vol. 1, N 2. – P. 513–518.

15. *Муртазина М.Ш.*, *Авдеенко Т.В.* Онтологический подход к поддержке процесса инженерии требований в Scrum // Сборник трудов ИТНТ-2018: IV Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии», Самара, 24–27 апреля 2018 г. – Самара: Новая техника, 2018. – С. 2610–2620.

16. Модели и методы построения информационных систем, основанных на формальных, логических и лингвистических подходах / И.С. Ануреев, Т.В. Батура, О.И. Боровикова, Ю.А. Загорулько, И.С. Кононенко, А.Г. Марчук, П.А. Марчук, Ф.А. Мурзин, Е.А. Сидорова, Н.В. Шилов; отв. ред. А.Г. Марчук. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 330 с.

17. Automated extraction of conceptual models from user stories via NLP / M. Robeer, G. Lucassen, J.M.E.M. van der Werf, F. Dalpiaz, S. Brinkkemper // 2016 IEEE 24th International Requirements Engineering (RE) Conference: proceedings. – Beijing, 2016. – P. 196–205. – doi: 10.1109/RE.2016.40.

18. *Assawamekin N., Sunetnanta T., Pluempitiwiriyawej C.* Ontology-based multiperspective requirements traceability framework // Knowledge and Information Systems. – 2010. – Vol. 25, N 3. – P. 493–522. – doi: 10.1007/s10115-009-0259-2.

19. Автоматическая обработка текстов на естественном языке и анализ данных: учебное пособие / Е.И. Большакова, К.В. Воронцов, Н.Э. Ефремова, Э.С. Клышинский, Н.В. Лукашевич, А.С. Сапин. – М.: Изд-во НИУ ВШЭ, 2017. – 269 с.

20. Слово и язык: сборник статей к восьмидесятилетию академика Ю.Д. Апресяна / отв. ред.: И.М. Богуславский, Л.Л. Иомдин, Л.П. Крысин. – М.: Языки славянских культур, 2011. – 735 с.

21. Система машинного перевода «Кросслятор 2.0» и анализ ее функциональности для задачи трансляции знаний / В.А. Галактионов, А.М. Мусатов, О.Ю. Мансурова, С.В. Ёлкин, Э.С. Клышинский, В.Ю. Максимов, С.Н. Аминева, Р.В. Жирнов, С.Ю. Игашов, Т.Н. Мусаева. – М.: б. и., 2007. – 27 с.

22. Многоцелевой лингвистический процессор ЭТАП-3 [Электронный ресурс]. – URL: http://iitp.ru/ru/ru/researchlabs/922.htm (дата обращения: 10.12.2018).

23. Development of a dependency treebank for Russian and its possible applications in NLP / I. Boguslavsky, I. Chardin, S. Grigorieva, N. Grigoriev, L. Iomdin, L. Kreidlin, N. Frid // Proceedings of the 3rd International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC-2002). – Las Palmas, 2002. – Vol. 3. – P. 852–856.

24. ABBYY Intelligent Search SDK [Электронный ресурс]. – URL: https://www.abbyy.com/ru-ru/isearch/compreno/ (дата обращения: 10.12.2018).

25. Texterra: a framework for text analysis / D.Yu. Turdakov, N.A. Astrakhantsev, Ya.R. Nedumov, A.A. Sysoev, I.A. Andrianov, V.D. Mayorov, D.G. Fedorenko, A.V. Korshunov, S.D. Kuznetsov // Programming and Computer Software. – 2014. – Vol. 40, iss. 5. – P. 288–295.

26. Texterra и анализ текстов [Электронный ресурс]. – URL: https://morphs.ru/posts/2017/03/18/texterra (дата обращения: 10.12.2018).

27. *Турдаков Д.* Анализ социальных сетей: охота на ботов и троллей [Электронный ресурс]. – URL: https://www.osp.ru/netcat_files/userfiles/TBD_1_2017/Turdakov_TBD.pdf (дата обращения: 28.08.2018).

28. Томита-парсер [Электронный ресурс]. – URL: https://tech.yandex.ru/tomita/ (дата обращения: 10.12.2018).

29. Seman [Electronic resource]. – URL: https://sourceforge.net/projects/seman/ (accessed: 10.12.2018).

30. *Сокирко А.В.* Семантические словари в автоматической обработке текста (по материалам системы ДИАЛИНГ): дис. … канд. техн. наук: 05.12.17. – М., 2001. – 88 с.

31. Автоматическая обработка текста [Электронный ресурс]. – URL: http://aot.ru/ (дата обращения: 10.12.2018).

32. Открытый корпус [Электронный ресурс]. – URL: http://opencorpora.org/ (дата обращения: 10.12.2018).

33. Quality assurance tools in the OpenCorpora project / V. Bocharov, S. Bichineva, D. Granovsky, N. Ostapuk, M. Stepanova // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: материалы ежегодной Международной конференции «Диалог» (Бекасово, 25–29 мая 2011 г.). – М.: Изд-во РГГУ, 2011. – С. 101–109.

Авдеенко Татьяна Владимировна, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной информатики, ведущий научный сотрудник Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: представление знаний, машинное обучение, математическое моделирование. Имеет более 150 научных публикаций. E-mail: avdeenko@corp.nstu.ru

Муртазина Марина Шамильевна, кандидат филосовских наук, аспирант, старший научный сотрудник Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: инженерия знаний, инженерия требований, управление в социально-экономических системах. Имеет более 40 научных публикаций. E-mail: murtazina@corp.nstu.ru

Гриф Михаил Геннадьевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: оптимальное проектирование человеко-машинных систем, интеллектуальный анализ текста, системы компьютерного сурдоперевода. Имеет более 300 научных публикаций. E-mail: grif@corp.nstu.ru

Avdeenko Tatiana Vladimirovna, D. Sc. (Eng.), professor at the department of theoretical and applied informatics, chief research worker, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are knowledge representation, machine learning, and mathematical modeling. She is the author of more than 150 scientific publications. E-mail: avdeenko@corp.nstu.ru

Murtazina Marina Shamil'evna, PhD (Philosophy), a postgraduate student, a leading research worker, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are focused on knowledge engineering, requirements engineering, management in economic and social systems. She is the author of more than 40 scientific publications. E-mail: murtazina@corp.nstu.ru

Grif Mikhail Gennadyevich, D. Sc. (Eng.), professor at the department of automated Conctrol systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests include an optimal design of man-machine systems, text mining, and computer-generated finger-speech systems. He is the author of more than 300 scientific publications. E-mail: grif@corp.nstu.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-27-46

On the possibilities of automatic text processing for constructing the ontology of requirements[*]

T.V. AVDEENKO[a]*, M.SH. MURTAZINA*[b]*, M.G. GRIF*[c]

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russia

[a] *avdeenko@corp.nstu.ru* [b] *murtazina@corp.nstu.ru* [c] *grif@corp.nstu.ru*

Abstract

The success of a software product depends on how well it meets the needs of end users as a tool for solving various problems. That is why requirements engineering, as a process in which the elicitation, analysis, specification and validation of the requirements take place, plays a key role in the development of software products. The trend of recent studies in the field of improving the process of requirements engineering is the development of methods for working with the requirements as with facts from the application domain model and the development of models for the representation of knowledge about requirements specification processes, re-

[*] *Received 04 October 2018.*

The reported study was funded by Russian Ministry of Education and Science, according to the research project No. 2.2327.2017/4.6.

quirements types, requirements quality criteria. The most suitable form of such complex knowledge representation is ontology. The present article discusses the key features of the ontological approach to the requirements engineering. Basic attention is focused on the possibilities of representing knowledge about the application domain of a software product in the form of ontology and, in particular, on automating this process. The relevance of developing the approaches to automatization of building the ontologies from natural text requirements is determined by the variability of the requirements from the stakeholders' part and the need for a quick comparison of the texts of requirements in order to identify concepts of the application domain and to analyze the relationships between the concepts. The main objective of this paper is to study the possibilities of automatic Russian text processing to build the requirements ontologies. We consider tools for automatic Russian text processing, such as ETAP-3, ABBYY Compreno, Texterra, Tomita-parser, RML (the AOT project). Using an example of the linguistic tools RML and STAGE-3, the results of processing the text of requirements in natural Russian have been analyzed.

Keywords: software engineering, requirements engineering, ontology, text processing, user story, ETAP-3, RML, AOT

REFERENCES

1. Lamsweerde A. Reasoning about alternative requirements options. *Conceptual modeling: foundations and applications*. Berlin, Springer, 2009. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5600, pp. 380–397. doi: 10.1007/978-3-642-02463-4_20.

2. ISO/IEC/IEEE 29148:2011. *Systems and software engineering. Life cycle processes. Requirements engineering*. IEEE, 2011. 83 p.

3. Leffingwell D., Widrig D. *Managing software requirements: a use case approach*. Boston, Addison-Wesley, 2003. 544 p.

4. Wiegers K., Beatty J. *Software requirements*. Redmond, WA, Microsoft Press, 2013. 637 p.

5. Bahill A.T., Henderson S.J. Requirements development, verification, and validation exhibited in famous failures. *Systems Engineering*, 2005, vol. 8, no. 1, pp. 1–14. doi: 10.1002/sys.20017.

6. Kott A., Peasant J. Representation and management of requirements: the RAPID-WS project. *Concurrent Engineering*, 2005, vol. 3, no 2, pp. 93–106. doi: 10.1177/1063293X9500300203.

7. Alexander I., Stevens R. *Writing better requirements*. Boston, Addison-Wesley, 2002. 159 p.

8. Gruber T.R. A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 1993, vol. 5, pp. 199–220. doi: 10.1006/knac.1993.1008.

9. Kossmann M., Wong R., Odeh M., Gillies A. Ontology-driven requirements engineering: building the OntoREM meta model. *Proceedings of the 3rd International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications*, Damascus, Syria, 2008, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICTTA.2008.4530315.

10. Castañeda V., Ballejos L., Caliusco M.L., Galli M.R. The use of ontologies in requirements engineering. *Global Journal of Research in Engineering*, 2010, vol. 10, iss. 6, pp. 2–8.

11. Goknil A., Kurtev I., Berg K. van den. A metamodeling approach for reasoning about requirements. *Model Driven Architecture – Foundations and Applications*: 4th European Conference, ECMDA-FA 2008: proceedings, Berlin, 2008, pp. 310–325.

12. Siegemund K. *Contributions to ontology-driven requirements engineering.* Dr.-Ing sci. diss. Dresden, Technischen Universität Dresden, 2014. 236 p.

13. Avdeenko T.V., Pustovalova N.V. Postroenie soglasovannoi modeli trebovanii dlya protsessa programmnoi inzhenerii [Building a harmonized model of requirements for software development process]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2016, iss. 1 (44), pp. 31–49. doi: 10.15622/sp.44.3. (In Russian).

14. Avdeenko T.V., Pustovalova N.V. The ontology-based approach to support the requirements engineering process. *13th International Scientific-Technical Conference on Actual problems of*

Electronic Instrument Engineering (APEIE-2016): proceedings, Novosibirsk, 2016, vol. 1, no 2, pp. 513–518. doi; 10.1109/APEIE.2016.7806406.

15. Murtazina M.Sh., Avdeenko T.V. [The ontology-driven approach to support the requirements engineering process in scrum framework]. *Sbornik trudov ITNT-2018: IV Mezhdunarodnaya konferentsiya i molodezhnaya shkola "Informatsionnye tekhnologii i nanotekhnologii"* [Proceedings of ITNT-2018. IV International Conference on Information Technology and Nanotechnology]. Samara, New technology Publ., 2018, pp. 2610–2620. (In Russian).

16. Anureev I.S., Batura T.V., Borovikova O.I., Zagorul'ko Yu.A., Kononenko I.S., Marchuk A.G., Marchuk P.A., Murzin F.A., Sidorova E.A., Shilov N.V. *Modeli i metody postroeniya informatsionnykh sistem, osnovannykh na formal'nykh, logicheskikh i lingvisticheskikh podkhodakh* [Models and methods of building information systems based on formal, logical and linguistic approaches]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2009. 330 p.

17. *Robeer M., Lucassen G., Werf J.M.E.M. van der, Dalpiaz F., Brinkkemper S.* Automated extraction of conceptual models from user stories via NLP. *2016 IEEE 24th International Requirements Engineering (RE) Conference: proceedings*, Beijing, 2016, pp. 196–205. doi: 10.1109/RE.2016.40.

18. Assawamekin N., Sunetnanta T., Pluempitiwiriyawej C. Ontology-based multiperspective requirements traceability framework. *Knowledge and Information Systems*, 2010, vol. 25, no. 3, pp. 493–522. doi: 10.1007/s10115-009-0259-2.

19. Bol'shakova E.I., Vorontsov K.V., Efremova N.E., Klyshinskii E.S., Lukashevich N.V., Sapin A.S. *Avtomaticheskaya obrabotka tekstov na estestvennom yazyke i analiz dannykh* [Automatic processing of natural language texts and data analysis]. Moscow, NIU VShE Publ., 2017. 269 p.

20. Boguslavskii I.M., Iomdin L.L., Krysin L.P., ed. *Slovo i yazyk: sbornik statei k vos'midesyatiletiyu akademika Yu.D. Apresyana* [Word and language. Collection of articles on the eightieth anniversary of Academician Yu.D. Apresyan]. Moscow, Yazyki slavyanskikh kul'tur Publ., 2011. 735 p.

21. Galaktionov V.A., Musatov A.M., Mansurova O.Yu., Elkin S.V., Klyshinskii E.S., Maksimov V.Yu., Amineva S.N., Zhirnov R.V., Igashov S.Yu., Musaeva T.N. *Sistema mashinnogo perevoda "Krosslyator 2.0" i analiz ee funktsional'nosti dlya zadachi translyatsii znanii* [The machine-translation system "Krossljator 2.0" and analysis of its functionality for the knowledge translation problem]. Moscow, 2007. 27 p.

22. *Mnogotselevoi lingvisticheskii protsessor ETAP-3* [The multifunctional ETAP-3 linguistic processor]. Available at: http://iitp.ru/ru/ru/researchlabs/922.htm (accessed 10.12.2018).

23. Boguslavsky I., Chardin I., Grigorieva S., Grigoriev N., Iomdin L., Kreidlin L., Frid N. Development of a dependency treebank for Russian and its possible applications in NLP. *Proceedings of the 3rd International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC-2002)*, Las Palmas, 2002, vol. 3, pp. 852–856.

24. *ABBYY Intelligent Search SDK*. (In Russian). Available at: https://www.abbyy.com/ru-ru/isearch/compreno/ (accessed 10.12.2018).

25. Turdakov D.Yu., Astrakhantsev N.A., Nedumov Ya.R., Sysoev A.A., Andrianov I.A., Mayorov V.D., Fedorenko D.G., Korshunov A.V., Kuznetsov S.D. Texterra: a framework for text analysis. *Programming and Computer Software*, 2014, vol. 40, iss. 5, pp. 288–295.

26. *Texterra i analiz tekstov* [Texterra and text analysis]. Available at: https://morphs.ru/posts/2017/03/18/texterra (accessed 10.12.2018).

27. Turdakov D. *Analiz sotsial'nykh setei: okhota na botov i trollei* [Analysis of social networks: hunting for bots and trolls]. Available at: https://www.osp.ru/netcat_files/userfiles/TBD_1_2017/Turdakov_TBD.pdf (accessed 10.12.2018).

28. *Tomita-parser* [Tomita parser]. Available at: https://tech.yandex.ru/tomita/ (accessed 10.12.2018).

29. *Seman*. Available at: https://sourceforge.net/projects/seman/ (accessed 10.12.2018).

30. Sokirko A.V. *Semanticheskie slovari v avtomaticheskoi obrabotke teksta (po materialam sistemy DIALING)*. Diss. kand. tekhn. nauk [Semantic dictionaries in automatic text processing (based on the DIALING system). PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2001. 88 p.

31. *Avtomaticheskaya obrabotka teksta* [Text processing]. Available at: http://aot.ru/ (accessed 10.12.2018).

32. *Otkrytyi korpus* [Open Corpora]. Available at: http://opencorpora.org/ (accessed 10.12.2018).

33. Bocharov V., Bichineva S., Granovsky D., Ostapuk N., Stepanova M. Quality assurance tools in the OpenCorpora project. *Komp'yuternaya lingvistika i intellektual'nye tekhnologii*: materialy ezhegodnoi Mezhdunarodnoi konferentsii "Dialog" [Proceedings of the 17th International conference on computational linguistics and intellectual technologies]. Moscow, 2011, pp. 101–109.

Для цитирования:

Авдеенко Т.В., Муртазина М.Ш., Гриф М.Г. О возможностях автоматической обработки текста в инженерии требований // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 4 (73). – С. 27–46. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-4-27-46.

For citation:

Avdeenko T.V., Murtazina M.Sh., Grif M.G. O vozmozhnostyakh avtomaticheskoi obrabotki teksta v inzhenerii trebovanii [On the possibilities of automatic text processing for constructing the ontology of requirements]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 4 (73), pp. 27–46. doi: 10.17212/1814-1196-2018-4-27-46.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 73, № 4, 2018, с. 47–58

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 73, No. 4, 2018, pp. 47–58

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 681.518.5+004.457 DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-47-58

An automated system of network and system administration of Windows and Linux family operating systems*

E.A. BASINYA

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation; Institute of Information and Communication Technologies, 48, Deputatskaya Street, Novosibirsk, 630099, Russian Federation

director@nii-ikt.ru

Abstract

Today, the automation of technological and business processes of an enterprise is one of the key trends in the development of information and communication technologies. As part of the development of management methodology and organization of services in this area, Helpdesk and ServiceDesk user support systems are becoming increasingly popular. However, most existing solutions do not consider the vulnerabilities of the TCP/IP protocol stack as well as the imperfection of software and operating systems, which often complicates the activities of information technology departments by loading them with routine work. This article presents the development of an automated system of network and system administration of Windows and Linux family operating systems, which includes the Helpdesk and ServiceDesk solutions functionality. The signature method of the system operation with the identification of the correlation of events is reviewed. An original approach to creating a knowledge base of the system is described. The solution was implemented using a platform for automated deployment and management of applications in a virtualization environment, which provides an additional level of reliability and fault tolerance. An algorithm for checking third-party software solutions for suspicious malicious activity is proposed, providing a qualitative analysis of the object being investigated: whether functions undeclared by the developer are present, whether any information is being sent to third parties, etc. A comprehensive approach to the management of the enterprise network infrastructure is presented. In order to ensure information security of network communications, encapsulated secure virtual communication channels were used. To ensure the confidentiality of data on the client side, the AES-256 encryption algorithm was used. The proposed approaches are recommended for corporate computer networks which include ten or more hosts operating on the basis of the TCP / IP protocol stack and Windows / Linux family operating systems.

Keywords: technical support, customer requests processing automation, system of user support and request accounting, system and network administration, Helpdesk, ServiceDesk, ITIL, ITSM

* *Received 18 October 2018.*

INTRODUCTION

Automation of technological and business processes of an enterprise is one of the key trends in the development of information and communication technologies. Government agencies and commercial establishments design and implement corporate computer networks based on the TCP/IP protocol stack and Ethernet data link layer technology. The system and network administration of an organization's information infrastructure is not only a creative engineering task, but also an important tool for optimizing an enterprise's business processes. Accordingly, it significantly influences the economic performance of the company, as well as the level of its competitiveness in the market. In the early 1990s, a scientific community developed a unified approach to the management of information technology as a service, which should have an appropriate quality and ensure a consistently high level of user satisfaction. This methodology was described in the IT Infrastructure Library. In May 2007, its third edition was introduced, describing a new format of the services' lifecycle. Based on this library, a method of managing and organizing information technology services ITSM (IT Service Management) was developed, the key element of which was the user support systems: Helpdesk and ServiceDesk. The task of the first system was the accounting and management of user requests [1-3]. Originally, technical requests of a company's employees were being processed by the information technology department. Systems like ServiceDesk were a logical extension of the Helpdesk systems, expanding their functions of managing incidents and service requests in all areas of the company's activities [4]. In these systems, the functionality of providing feedback to users via various communication channels is implemented: e-mail, chat rooms, messengers, social networks, etc. This enabled forming a service-oriented service, which is a single point of interaction between the service provider and the user [5-7].

Under this topic, a lot of research and development work is carried out by Russian and foreign scientists, among them are Zabotina N.N., Zolnikova S.N., Sokolov N.E., TipikinYu.A., Odintsov I.V., Makhnovsky A. and many others [8-19].

It is worth noting that most of the proposed algorithms and methods allow improving the quality of customer service and profitability of economic activity. However, these solutions do not consider the vulnerabilities of the TCP / IP protocol stack and software imperfections, including operating systems. Business interests lower the priority of high-quality technical implementation, which often complicates the activities of information technology departments, loading them with routine work.

Information security issues are an integral part of the task of automating technological and business processes of an enterprise. Potential damage caused by the breach of confidentiality of commercial data may cause irreparable economic harm to the company.

1. PROBLEM STATEMENT

The aim of the work was to develop and study an automated system of network and system administration of the Windows and Linux family operating systems, including the functionality of the Helpdesk and ServiceDesk solutions.

An algorithm for checking third-party software solutions for suspicious malicious activity needed to be developed and included in the system. In this context particular importance was given to the potential absence of antiviral agents on the client side. It was necessary to ensure both the security of network communications and the confidentiality of data on the client side

2. DESIGN AND IMPLEMENTATION OF THE SYSTEM

The development and software implementation of the proposed network and system administration system of the Windows and Linux family operating systems was carried out in two versions. The first version was presented as an independent end product commissioned by a commercial holding. The second version was designed and implemented as a module of the system of intellectual and adaptive management of an enterprise's network infrastructure developed by the author.

This article presents the material of the second project implementation. At the design stage, the following functions of the developed system were embedded:

- receiving and processing requests through various communication channels (e-mail, online chat rooms, messengers, social networks, etc.), primary communication with customers or employees of the company;
- semantic analysis of the query text, an attempt to automatically solve the problem or provide a suitable article from the knowledge base;
- evaluation of the request, delegation to the most appropriate specialist in the absence of the possibility of applying the solution in automatic mode;
- accounting and tracking of requests and incidents;
- informing customers/employees about the status of requests and the progress of their execution;
- monitoring the level of service in accordance with the SLA agreement (Service Level Agreement);
- management of the lifecycle of incidents and requests, including their closure and verification;
- alerting, informing and coordinating employees and customers;
- providing tools of a flexible project maintenance methodology;
- processing and analysis of logs of the operating system and installed software in the enterprise corporate computer network;
- providing tools to verify third-party software solutions for suspicious malicious activity in corporate computer network;
- automatic identification and solution of local technical problems;
- monitoring network infrastructure of the enterprise;
- monitoring employee activity on personal computers;
- and many others.

The proposed original solutions in the field of system and network administration are worth considering in more detail. At first sight, processing and analyzing the logs of the operating system and the installed software is a rather trivial task. However, a simple example of the remote work of the user of the host A on the host B for one hour using the Remote Desktop Protocol (RDP) should be given. In the event log of the Windows operating system EVTX (XML Event Log) there

may appear more than 60 entries of entry/exit events with identical id instead of the expected two.

Another interesting example is the work with the volume shadow copy service, which can be accessed by various applications and services, including over the network. If this service fails, the number of events per minute can exceed 500 units, cyclically referring to each other. To compile an objective picture of what happened, it is necessary to collect additional information from the system, parse, process and analyze it. In order to meet such objectives, an enhanced signature approach with the identification of event correlation was integrated with the system. The initial knowledge base was compiled in a virtualization environment based on the ESXi hypervisor, which had more than 10 copies of each of the popular Windows and Linux family operating systems being deployed. Next, the tools of testing, passive and active analysis of operating systems and applications were used. For local testing, additional scripts which caused failures and malfunctions were written to check the reliability and fault tolerance of the software. During one hundred iterations of each individual network/local disturbance, the client-server model tracked the events being recorded and identified the correlation. Thus, the initial knowledge base was being compiled.

Importantly, each iteration was carried out towards the reference image of the operating system, a return to which was driven through snapshots system. Adding new entries to the general knowledge base of the corporate solution is being carried out only on the basis of similar results from 50% of clients with the number of hosts with identical software from 10 units.

This approach allowed us to perform automatic identification and solution of local technical problems. The situation with the problem of the receipt of the TCP/IP protocol stack settings by the host can serve as a simple example. The system identifies the failure of the DHCP-client service, tracks its dependencies on other services and finds the one being stopped. After that the system launches them in the correct order and restoring the full functioning of the service.

To implement the verification of third-party software solutions for suspicious malicious activity, an original algorithm was developed, shown in Figure 1.

This algorithm provides the technician and/or technically competent user with a qualitative analysis of the object being investigated: whether functions undeclared by the developer are present, whether any information is being sent to third parties, etc. However, it is important to note that the algorithm does not replace a full-fledged audit of the program code (including that being carried out through disassembly). It is also not possible to detect in a closed source code a tool for hidden data collection or information management (backdoor), if it was in passive ("sleeping") mode.

Monitoring of the enterprise network infrastructure is being carried out using network management protocols and a decentralized knowledge base of participants in the interaction of the corporate computer network. This includes control of the versions of the installed software and the hardware solutions used on each device. This functionality is fully implemented by the system of intellectual adaptive management of the enterprise network infrastructure, developed by the author. As noted previously, the network and system administration system of the Windows and Linux family operating systems is its integral part. The components of the client part of the system are illustrated in Figure 2.

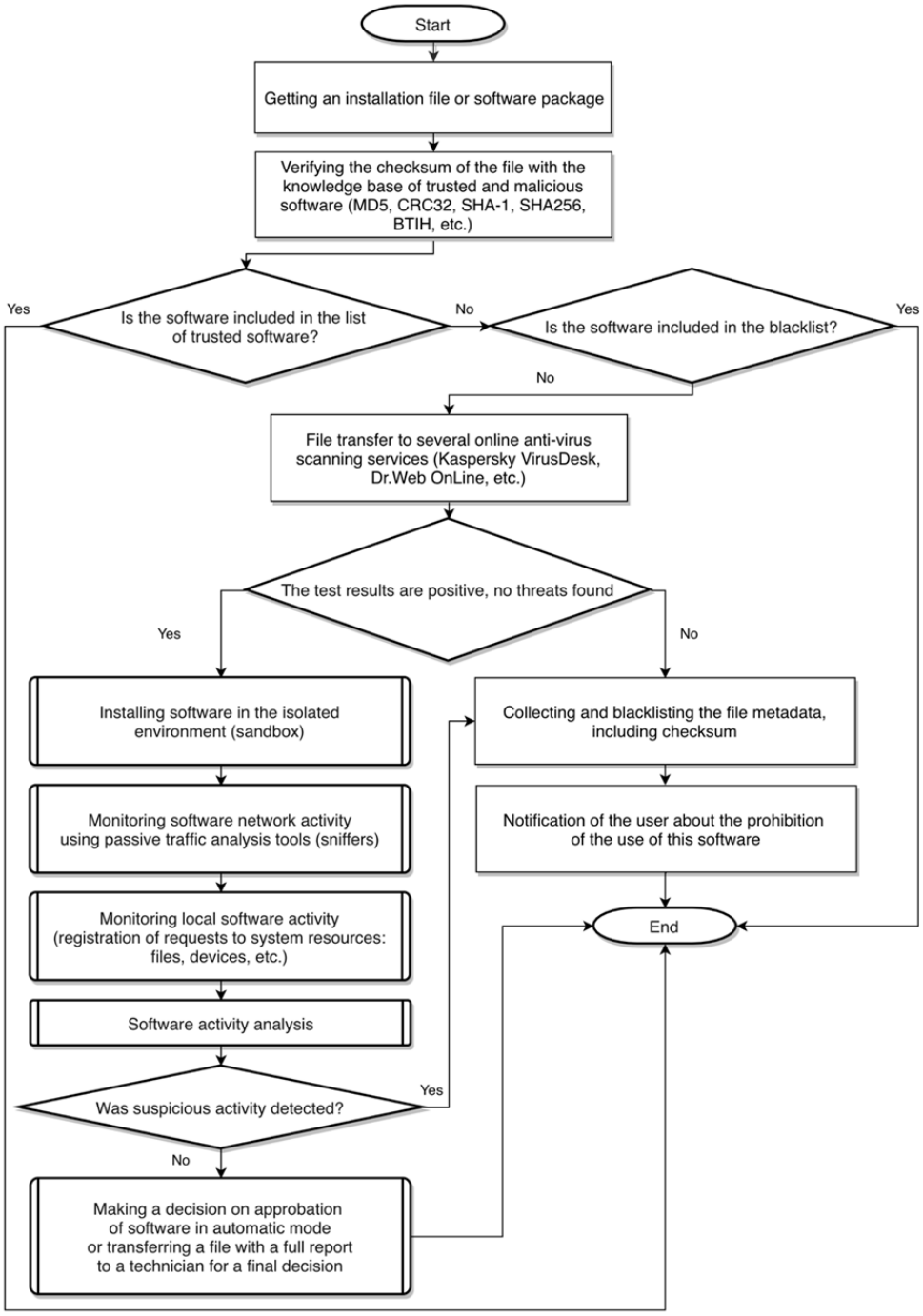

Fig. 1. An algorithm for checking third-party software solutions for suspicious malicious activity

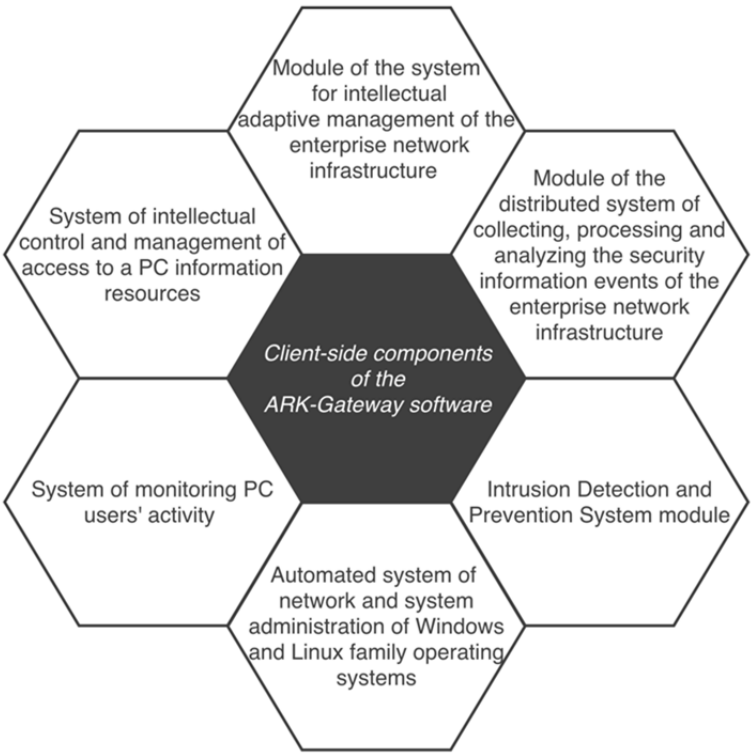

Fig. 2. The components of the client part of the system

The decision to use different components in the same client software implementation was made taking into account two factors. The first is the necessity of ensuring the comprehensive intelligent adaptive management of the enterprise network infrastructure. The second is the willingness to optimize the use of the computational power pool, since most components have overlapping functionality and access to the same resources. It is firstly referred to the operating system and application logs, however, in some cases, to the access to equipment. Thus, the system of intellectual control and management of access to information resources of a personal computer controls the connected data storage devices and used data transmission networks. The purpose of these actions is to prevent illegal copying of information. At the same time, an automated network and system administration system monitors the operation of hardware resources in order to provide reliable and fault-tolerant functioning of the host.

During the work, the architecture of the server part of the system was designed and implemented, as shown in Figure 3.

The software solution was created using the platform for applications automated deployment and management in a virtualization environment. This ensures a high level of reliability and fault tolerance of the system.

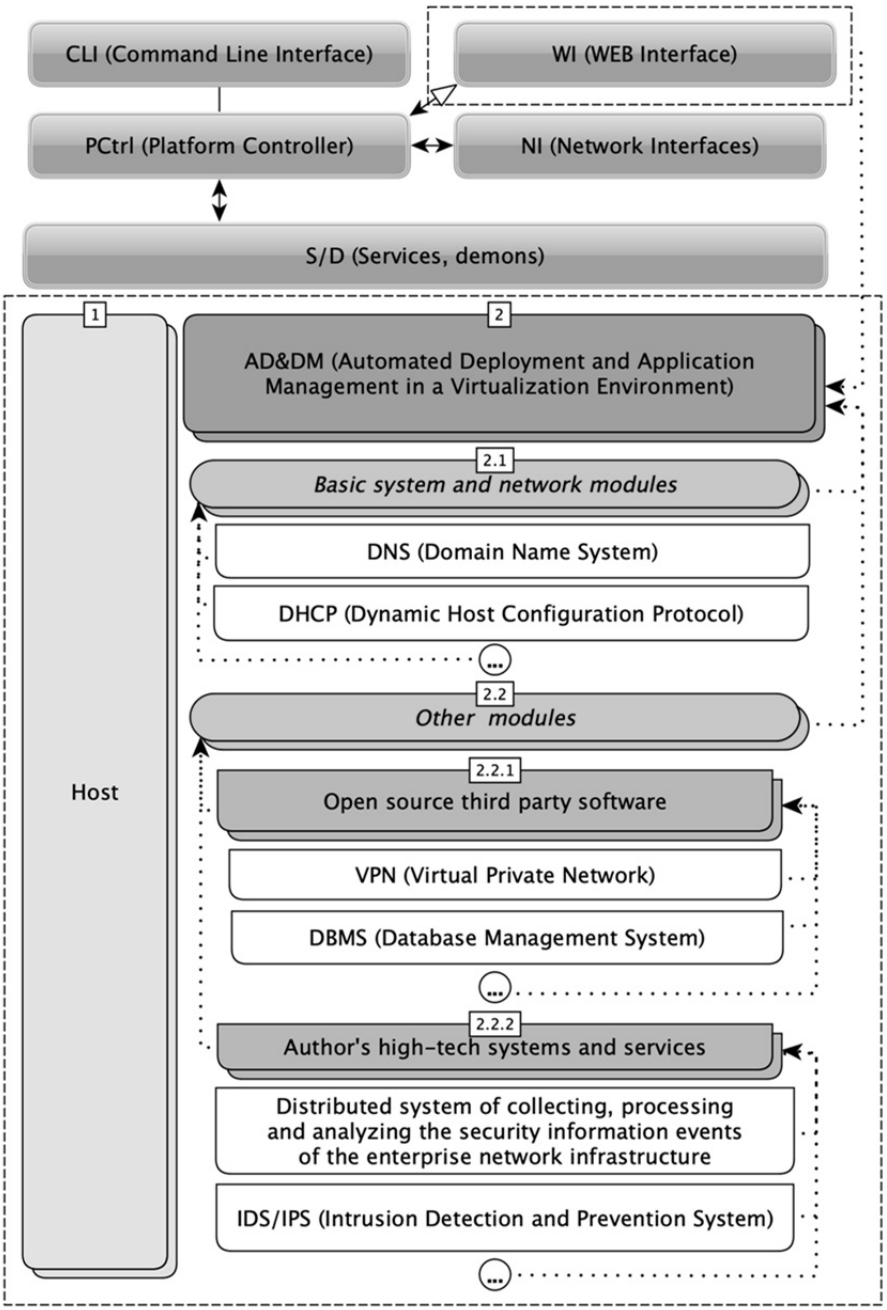

Fig. 3. The architecture of the server part of the system

The software implementation of the server part was performed using Python, Flask, C ++, Bash, Docker, Ansible on the basis of AlpineLinux OS. The client module for Windows family operating systems was written in the C# programming language using native controls from the Windows Forms .NET library. For the Linux family, Python and the Qt framework were used. Encapsulated virtual secure communication channels (VPN, Virtual Private Network) helped to ensure the protection of data transmission over the network. Depending on the project build, the

following technologies were used: Gate VPN, GoVPN, Tinc, Wire Guard, Free-LAN, Open VPN, IPsec and others. Secure local data storage was provided by the symmetric block encryption algorithm AES-256 (Advanced Encryption Standard).

Both during the development and afterwards, manual and automated testing of the developed software product (client and server parts, as well as their interaction) was performed.

The developed solution significantly extends the existing systems such as Helpdesk and ServiceDesk. The integration of the first version of the system at the customer's enterprise (with a number of hosts of more than 500 units) allowed to optimize the work of the information technology department and to reduce the time costs for system and network administration of the existing infrastructure of the company by 70%.The general knowledge base of the system is not updated in enterprises with fewer than ten hosts, which may be mentioned as a disadvantage of the proposed approach. Adding new entries to the general knowledge base of the corporate solution is carried out only on the basis of similar results from 50% of clients with the number of hosts with identical software from 10 units. The described development has been registered as an object of intellectual property [20].

CONCLUSION

In this paper the design and implementation of an automated network and system administration system for Windows and Linux family operating systems, which includes the Helpdesk and ServiceDesk solutions functionality, is presented. The signature method of the operation of the system with the identification of the correlation of events is reviewed. An original approach to creating a knowledge base of the system is described. The solution was implemented using a platform for automated deployment and management of applications in a virtualization environment, which provides an additional level of reliability and fault tolerance. An algorithm for checking third-party software solutions for suspicious malicious activity is proposed, providing a qualitative analysis of the object being investigated: respective of whether functions undeclared by the developer are present or whether any information is being sent to third parties, etc. A comprehensive approach to the management of an enterprise network infrastructure is also reviewed. In order to ensure information security of network communications, encapsulated secure virtual communication channels were used, while the AES-256 encryption algorithm was used to ensure data privacy on the client side.

The proposed approaches are recommended for use in enterprise network infrastructure management systems with a number of hosts from ten units operating on the basis of the TCP/IP protocol stack and the Windows/Linux family operating systems.

REFERENCES

1. Glushenko S.A., Dolzhenko A.I., Maleev D.V. Razrabotka sistemy Helpdesk dlya otdela soprovozhdeniya OOO "Elektronnaya meditsina" [Development system Helpdesk for maintenance department of "Electronic medicine"]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta (RINKh) – Vestnik of Rostov state university of economics (RINH)*, 2016, no. 2 (54), pp. 93–102.

2. Nikiforov O.Yu. Pokazateli effektivnosti vnedreniya sistemy Help Desk i edinoi uchetnoi zapisi [Performance indicators for the implementation of the help desk system and a single account]. *Novaum.ru*, 2018, no. 12, pp. 24–26. (In Russian).

3. Prakhin D. Sistema vsDesk. Bol'shoi pomoshchnik malen'kogo IT-otdela [VSDESK system. A great assistant to a small IT department]. *Sistemnyi administrator – System Administrator*, 2015, no. 10 (155), pp. 9–15.

4. Golosov D. ManageEngine ServiceDesk Plus. Ch. 2. Obzor vozmozhnostei [ManageEngine ServiceDesk Plus. Pt. 2. Overview of features]. *Sistemnyi administrator – System Administrator*, 2015, no. 12 (157), pp. 14–20.

5. Lyamukov S. Universal'nyi ITSM [Universal ITSM]. *Otkrytye sistemy. SUBD – Open Systems. DBMS*, 2014, no. 3, pp. 22–26.

6. Sterlyagov S.P., Bezmaternykh N.A. Sovershenstvovanie deyatel'nosti otdela informatsionnykh tekhnologii nalogovoi inspektsii na osnove metodologii ITSM/ITIL [Improvement of the activity of the information technology department of the tax inspection on the basis of the ITSM/ITIL methodology]. *Internet-zhurnal Naukovedenie – Online journal science research*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 1–13.

7. Golosov D. Avtomatizatsiya raboty IT-podrazdeleniya s pomoshch'yu ITSM-sistemy [Automation of the IT department using ITSM-system]. *Sistemnyi administrator – System Administrator*, 2015, no. 7–8 (152–153), pp. 9–13.

8. Zabotina N.N., Vasil'kov Yu.V., Gushchina L.S. Upravlenie intsidentami v IT-infrastrukture predpriyatiya [Incident management in the enterprise IT infrastructure]. *Informatizatsiya i svyaz' – Informatization and communication,* 2016, no. 2, pp. 31–35.

9. Malaev A.N. Kachestvo operativnogo upravleniya v sfere tekhnicheskoi podderzhki bankovskikh ustroistv samoobsluzhivaniya [Quality of operational management in the field of technical support of self-service banking devices]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta – Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 2015, no. 1 (51), pp. 223–225.

10. Zol'nikova S.N., Deberdieva E.M. Povyshenie effektivnosti deyatel'nosti IT-podrazdeleniya [Improving the efficiency of the IT department]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo – Journal of Economy and Entrepreneurship*, 2014, no. 11-3 (52), pp. 364–368.

11. Kokunov V.A., Sokolov N.E., Sharabaeva L.Yu. Problemy vnedreniya i soprovozhdeniya informatsionnykh sistem [Problems of implementation and maintenance of information systems]. *Upravlencheskoe konsul'tirovanie – Administrative Consulting*, 2014, no. 9 (69), pp. 146–153.

12. Sergeeva A. Raspredelennye virtual'nye stendy dlya testirovaniya veb-servernykh prilozhenii [Distributed virtual stands for testing web server applications]. *Sistemnyi administrator – System Administrator*, 2014, no. 11 (144), pp. 78–84.

13. Yuzhanin N.V., Tipikin Yu.A., Gankevich I.G., Zolotarev V.I. Computational task tracking complex in the scientific project informational support system. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie – Computer Research and Modeling*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 615–620.

14. Ponachugin A.V., Odintsov I.V. Sistema kontrolya za nesanktsionirovannoi deyatel'nost'yu pol'zovatelei komp'yuternoi seti [Control system for unauthorized activity of computer network users]. *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody – Software systems and computational methods*, 2016, no. 1, pp. 23–31.

15. Latypova O.Yu., Agievich V.A., Nagoryanskii O.N. Primenenie sistemy pokazatelei dlya sovershenstvovaniya protsessa upravleniya podderzhkoi pol'zovatelei na osnove metodologii COBIT 5 [Application of the scorecard to improve the process of managing user support based on the COBIT 5 methodology]. *Vestnik kibernetiki – Proceedings in Cybernetics*, 2015, no. 3 (19), pp. 186–192.

16. Efremova L.I., Kurganov A.N. Formirovanie portfelya prikladnykh sistem dlya predpriyatiya gazodobyvayushchei otrasli [Formation of a portfolio of application systems for the gas industry]. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii – Information Systems and Technologies*, 2017, no. 3 (101), pp. 57–66.

17. Filippov O. Instrumenty tekhnicheskoi podderzhki filial'noi seti [Branch network technical support tools]. *Sistemnyi administrator – System Administrator*, 2017, no. 4 (173), pp. 34–37.

18. Grishakov V.G., Frolov D.V. Modelirovanie v sisteme tekhnicheskoi podderzhki vychislitel'nykh klasterov [Modeling in the system of technical support for computing clusters]. *Programmnye produkty i sistemy – Software & Systems*, 2014, no. 3, pp. 72–78.

19. Makhnovskii A. Integratsiya IDM v IT-infrastrukturu predpriyatiya [IDM integration into enterprise IT infrastructure]. *Zashchita informatsii. Insaid*, 2015, no. 1 (61), pp. 18–19. (In Russian).

20. Basinya E.A. *Avtomatizirovannaya sistema setevogo i sistemnogo administrirovaniya operatsionnykh sistem semeistva Windows i Linux* [Automated system of network and system administration of Windows and Linux family operating systems]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 2018662438, 2018.

Басыня Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета, директор Научно-исследовательского института информационно-коммуникационных технологий. Основные направления научных исследований: сетевая информационная безопасность, оверлейные технологии, автоматизация и управление в области информационных технологий. Имеет более 30 публикаций. E-mail:director@nii-ikt.ru

Basinya Evgeny Alexandrovich, PhD (Eng.), an associate professor at the automation department in the Novosibirsk State Technical University, director of the Research InstiIute of information-Communication Technologies. His research interests are focused on network information security, overlay technologies, automation and management in the field of information technologies. He has published more than 30 scientific papers. E-mail:director@nii-ikt.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-47-58

Автоматизированная система сетевого и системного администрирования операционных систем семейства Windows и Linux[*]

Е.А. БАСЫНЯ

630073, РФ, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет; 630099, РФ, г. Новосибирск, ул. Депутатская, 48, Научно-исследовательский институт информационно-коммуникационных технологий

director@nii-ikt.ru

На сегодняшний день автоматизация технологических и бизнес-процессов предприятия является одним из ключевых трендов развития информационно-коммуникационных технологий. В рамках развития методологии управления и организации услуг в данной сфере все большую популярность приобретают системы поддержки пользователей Helpdesk и ServiceDesk. Однако большинство существующих решений не учитывают уязвимости стека протоколов TCP/IP и несовершенство программного обеспечения, в том числе и операционных систем, что зачастую усложняет деятельность отделов информационных технологий. В данной статье представлена разработка автоматизированной системы сетевого и системного администрирования операционных систем семейства Windows и Linux, включающей функционал Helpdesk и ServiceDesk решений. На обзор вынесен сигнатурный метод ее функционирования с идентификацией корреляции событий. Описан оригинальный подход составления базы знаний

[*] *Статья получена 18 октября 2018 г.*

системы. Решение выполнено с использованием платформы автоматизации развертывания и управления приложениями в среде виртуализации, что предоставляет дополнительный уровень надежности и отказоустойчивости. Предложен алгоритм проверки программных решений сторонних разработчиков на предмет подозрительной вредоносной активности, предоставляющий качественный анализ исследуемого объекта: присутствуют ли незадекларированные разработчиком функции, отсылается ли какая-то информация третьим лицам и т. д. Представлен комплексный подход к управлению сетевой инфраструктурой предприятия. Для обеспечения информационной безопасности сетевых коммуникаций использовались инкапсулированные защищенные виртуальные каналы связи. Для обеспечения конфиденциальности данных на стороне клиента был задействован алгоритм шифрования AES-256. Предложенные подходы рекомендуются к применению в корпоративных вычислительных сетях с количеством хостов от десяти единиц, функционирующих на основе стека протоколов TCP/IP, и операционных системах семейства Windows/Linux.

Ключевые слова: техническая поддержка, автоматизация обработки запросов клиентов, системы поддержки пользователей и учета заявок, системное и сетевое администрирование, Helpdesk, ServiceDesk, ITIL, ITSM

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Глушенко С.А., Долженко А.И., Малеев Д.В.* Разработка системы Helpdesk для отдела сопровождения ООО «Электронная медицина» // Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). – 2016. – № 2 (54). – С. 93–102.

2. *Никифоров О.Ю.* Показатели эффективности внедрения системы Help Desk и единой учетной записи // Novaum.ru. – 2018. – № 12. – С. 24–26.

3. *Прахин Д.* Система vsDesk. Большой помощник маленького ИТ-отдела // Системный администратор. – 2015. – № 10 (155). – С. 9–15.

4. *Голосов Д.* ManageEngine ServiceDesk Plus. Ч. 2. Обзор возможностей // Системный администратор. – 2015. – № 12 (157). – С. 14–20.

5. *Лямуков С.* Универсальный ITSM // Открытые системы. СУБД. – 2014. – № 3. – С. 22–26.

6. *Стерлягов С.П., Безматерных Н.А.* Совершенствование деятельности отдела информационных технологий налоговой инспекции на основе методологии ITSM/ITIL // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9, № 3. – С. 1–13.

7. *Голосов Д.* Автоматизация работы ИТ-подразделения с помощью ITSM-системы // Системный администратор. – 2015. – № 7–8 (152–153). – С. 9–13.

8. *Заботина Н.Н., Васильков Ю.В., Гущина Л.С.* Управление инцидентами в ИТ-инфраструктуре предприятия // Информатизация и связь. – 2016. – № 2. – С. 31–35.

9. *Малаев А.Н.* Качество оперативного управления в сфере технической поддержки банковских устройств самообслуживания // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2015. – № 1 (51). – С. 223–225.

10. *Зольникова С.Н., Дебердиева Е.М.* Повышение эффективности деятельности ИТ-подразделения // Экономика и предпринимательство. – 2014. – № 11-3 (52). – С. 364–368.

11. *Кокунов В.А., Соколов Н.Е., Шарабаева Л.Ю.* Проблемы внедрения и сопровождения информационных систем // Управленческое консультирование. – 2014. – № 9 (69). – С. 146–153.

12. *Сергеева А.* Распределенные виртуальные стенды для тестирования веб-серверных приложений // Системный администратор. – 2014. – № 11 (144). – С. 78–84.

13. Computational task tracking complex in the scientific project informational support system / N.V. Yuzhanin, Yu.A. Tipikin, I.G. Gankevich, V.I. Zolotarev // Компьютерные исследования и моделирование. – 2015. – Т. 7, № 3. – С. 615–620.

14. *Поначугин А.В., Одинцов И.В.* Система контроля за несанкционированной деятельностью пользователей компьютерной сети // Программные системы и вычислительные методы. – 2016. – № 1. – С. 23–31.

15. *Латыпова О.Ю., Агиевич В.А., Нагорянский О.Н.* Применение системы показателей для совершенствования процесса управления поддержкой пользователей на основе методологии COBIT 5 // Вестник кибернетики. – 2015. – № 3 (19). – С. 186–192.

16. *Ефремова Л.И., Курганов А.Н.* Формирование портфеля прикладных систем для предприятия газодобывающей отрасли // Информационные системы и технологии. – 2017. – № 3 (101). – С. 57–66.

17. *Филиппов О.* Инструменты технической поддержки филиальной сети // Системный администратор. – 2017. – № 4 (173). – С. 34–37.

18. *Гришаков В.Г., Фролов Д.В.* Моделирование в системе технической поддержки вычислительных кластеров // Программные продукты и системы. – 2014. – № 3. – С. 72–78.

19. *Махновский А.* Интеграция IDM в ИТ-инфраструктуру предприятия // Защита информации. Инсайд. – 2015. – № 1 (61). – С. 18–19.

20. Автоматизированная система сетевого и системного администрирования операционных систем семейства Windows и Linux: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018662438 / Е.А. Басыня. – Зарег. 08.10.2018.

For citation:

Basinya E.A. Avtomatizirovannaya sistema setevogo i sistemnogo administrirovaniya operatsionnykh sistem semeistva Windows i Linux [An automated system of network and system administration of Windows and Linux family operating systems]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 4 (73), pp. 47–58. doi: 10.17212/1814-1196-2018-4-47-58.

Для цитирования:

Басыня Е.А. Автоматизированная система сетевого и системного администрирования операционных систем семейства Windows и Linux // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 4 (73). – С. 47–58. – Яз. англ. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-4-47-58.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 73, № 4, 2018, с. 59–78

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 73, No. 4, 2018, pp. 59–78

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

UDC 550.837:517.958 DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-59-78

A study of equivalence of influences of varying thickness and conductivity in 3D-processing of airborne electromagnetic data in complex media*

N.V. KONDRATYEV[a], D.S. KISELEV[b], D.V. VAGIN[c], M.G. PERSOVA[d], Yu.G. SOLOVEICHIK[e]

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Department of Applied Mathematics

[a] *kondratyev@ami.nstu.ru* [b] *harlequin_00@mail.ru* [c] *vdv_wk@mail.ru*
[d] *persova@ami.nstu.ru* [e] *soloveychik@ami.nstu.ru*

Abstract

The paper is devoted to the problem of processing the airborne electromagnetic (AEM) data with a view to developing recommendations on parameterization of a geological medium for carrying out the geometric 3D-inversion of airborne data. The study is performed with the use of finite element 3D-modeling of transient EM fields induced by the helicopter AEM system in complex media followed by the 3D-inversion of airborne synthesized data. The geoelectrical models chosen for investigation are taken as typical of this class of airborne EM surveys: the rugged topography and the conductive inhomogeneous top layer, which overlaps the low-resistive layer containing target conductive bodies. It is shown that, if the variations of the top layer thickness do not exceed 30…35 m in performing 3D-inversion, as a minimum, at its first stage, the top layer can be recovered as equivalent with constant (but recovered) thickness, i.e. when the top layer is parameterized in the inverse problem, in the vector of the unknowns we can include only lateral borders of 3D-inhomogeneities, their conductivity, and layer thickness described by one parameter. It is also shown that, if, in the medium under study, the variations of the top layer thickness are more significant, its bottom border should be recovered in more detail, because otherwise the target objects located in the second layer with the responses of about 15…20 % of the measured signals can be missed, while, in the case of recovering the top layer parameters more accurately, these target objects can be discovered quite confidently.

Keywords: airborne electromagnetic survey, numerical 3D-modeling, geometric 3D-inversion, electromagnetic field, sounding in time domain, topography, equivalent solutions, inverse problems

---

* *Received 09 March 2018.*
The study was performed with financial support from the President grant no. MD-3516.2017.5 and the President grant no. MK-5010.2018.9.

INTRODUCTION

Nowadays, the airborne electrical survey is widely used for geophysical investigations of large remote areas with the purpose of finding the solid mineral deposits and ground waters, performing engineering surveys, etc. The sounding is carried out with the use of airborne electromagnetic systems in which, as a rule, the electromagnetic field source and receiver are moved using the helicopter, and electromagnetic responses are studied in time domain after turning-off the current in the source [1, 2, 6]. The important place in implementing these technologies is taken by data processing, the quality of which, in fact, determines the effectiveness of airborne electromagnetic investigation as a whole.

However, the practice of airborne electromagnetic survey is that the investigated media, besides target objects (as a rule, local conductive bodies of small sizes, including Kimberlite pipes, subvertical objects, which are typical of ore deposits, etc.), contain the geological objects-noises in the top layers overlapping the layers with target objects. These media are also characterized by elevations in the Earth surface relief and depths of subhorizontal borders between the layers of a geological medium. The response of target objects in the measured signal is mixed with the response of objects-noises. This has led to meaninglessness of applications of widely used local 1D-inversions and to skipping target objects and/or finding erroneous ones.

In that regard, many scientific works in this direction are related with improving the numerical methods and corresponding software implementing 3-D inversion of airborne electromagnetic data [5, 6, 10, 11, 14, 18, 19], which are based on highly accurate multidimensional numerical modeling and solving multidimensional inverse problems (3D-inversions).

The most common approaches to performing 3D-inversions are the approaches based on dividing the investigated volume into small cells in which the values of conductivity are determined (for example, [5, 6, 10, 18, 19]). However, the workability of these approaches is, as a rule, suggested with the use of synthetic data obtained for quite simple geoelectrical 3D-models that cannot guarantee the obtaining of acceptable results in practice when the geoelectrical structure of the investigated medium is more complex. Moreover, these approaches require a very fine tuning and highly depend on the user qualification that complicates the processing of big arrays of practical data.

Therefore, nowadays the alternative approach to 3D-inversions a geometric 3D-inversion (it is named also as “parametric” [7, 8] or “block inversion” [3, 16]) is developed. This approach is based on joint recovery of the shape of structural parts of the geoelectrical model and their physical properties [9, 11, 12].

One of the main questions in developing the geometric 3D-inversion algorithm is parameterization of the unknown geoelectrical model of a geological medium. On the one hand, the number of unknown parameters should be quite sufficient for representing the shape of all structural geoelectrical model parts, which give a significant response in the measured signal, but on the other hand, it is important to minimize the number of these parameters with a purpose, firstly, to reduce the computational costs, and secondly, to reduce the number of equivalent solutions and provide more stable convergence of solving the nonlinear inverse problem.

In this paper, using the geometric 3D-inversion [9, 11, 12] algorithm, we presented the results of investigation concerning possible equivalent solutions in processing the data of airborne electrical survey. These results make it possible to formulate recommendations to constructing the initial models (parameterization) of a geological medium for performing the geometric 3D-inversions.

1. PROBLEM DEFINITION

A common cause of finding the equivalent solutions of inverse electrical survey problems is the fact that the change of conductivity and corresponding change of the thickness of the geoelectrical model structural parts (the subhorizontal borders of geological layers and 3D-inhomogeneities included in them) give close responses in the measured signal.

Note that in ground and marine technologies of electrical survey, which are applied in oil and gas prospecting, the subhorizontal borders of a geological medium are quite often defined using the seismic data.

However, as a rule, seismic prospecting is not included into the series of works relating to airborne electrical survey, therefore, the subhorizontal borders of a geological medium are unknown as well as the conductivity distribution and lateral borders of 3D-inhomogeneities. At the same time, the geological media in which the airborne electrical survey is carried out can be considered as three-layered media (that follows from their responses in measured signals). In these situations, the top layer is conductive and contains lateral 3D-inhomogeneities, which are, in fact, the preventing factors (the so-called geological objects-noises). The second layer is, as a rule, quite homogeneous, low-conductive and contains target objects. The third layer can also be inhomogeneous, but it has a depth such that the signals registered in the receivers are influenced either by overall layer conductivity or sufficiently big geoelectrical inhomogeneities in this layer.

Therefore, in spite of the fact that the target is the second layer, it is almost impossible to recover its structure (i.e. location, shape, and conductivity of target objects) without recovering the structure of the top layer (true or even its equivalent). In this relation, the following question appears: is it sufficient (for determining the responses of target objects in the measured signals) to conduct a search for the lateral distribution of conductivity in the top layer of constant (equivalent) thickness, thereby significant reducing the number of unknown parameters (and, correspondingly, run time of 3D-inversion), or is it necessary to search simultaneously for the conductivity distribution in the top layer and its thickness changing on the area.

We perform these studies in the following way. Using the 3D-modeling of airborne electrical survey, we obtain “experimental” (synthetic) data for a typical (to a sufficiently wide class of the airborne electrical survey problems) geoelectrical model the top layer of which has a varied thickness. Then, using the geometric 3D-inversion of these “experimental” data, we search for an equivalent (in the sense of response in the measured signal) model of conductivity distribution in the top layer with a constant depth. Obtaining the equivalent model as a result of the inversion allows us to recommend the use only lateral borders of 3D-inhomogeneities, their conductivity, and layer thickness described by a single parameter for parameterization of the top layer in the inversion of the practical data.

2. MATHEMATICAL MODELS

2.1. FORWARD PROBLEM SOLUTION

In order to calculate the electromagnetic field induced and received by the induction loops of the airborne system in time domain, we use the vector finite element method with edge basis functions on 3D-hexahedral non-conforming meshes with "hanging" nodes [4, 5, 17, 20, 22, 23]. The description of the electromagnetic field requires the use of the vector-potential $\vec{\mathbf{A}}$, which relates with the electrical field and magnetic induction by the ratios $\vec{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathbf{A}}}{\partial t}$ and $\vec{\mathbf{B}} = \nabla \times \vec{\mathbf{A}}$. In its turn, the functions $\vec{\mathbf{A}}$, $\vec{\mathbf{E}}$, and $\vec{\mathbf{B}}$ appear as $\vec{\mathbf{A}} = \vec{\mathbf{A}}^p + \vec{\mathbf{A}}^s$, $\vec{\mathbf{E}} = \vec{\mathbf{E}}^p + \vec{\mathbf{E}}^s$, and $\vec{\mathbf{B}} = \vec{\mathbf{B}}^p + \vec{\mathbf{B}}^s$, respectively, where the functions $\vec{\mathbf{A}}^p$, $\vec{\mathbf{E}}^p$, and $\vec{\mathbf{B}}^p$ describe the field in a homogeneous non-conductive medium and can be calculated either analytically or numerically by means of solution of the corresponding axisymmetrical problem (for example, [13]). The function $\vec{\mathbf{E}}^p$ is fully determined by changing the current in the transmitter and calculated as $-\frac{\partial \vec{\mathbf{A}}^p}{\partial t}$.

The electromagnetic field in three dimensional computational domain Ω can be found from the solution of vector differential equation

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \nabla \times \vec{\mathbf{A}}^s + \sigma \frac{\partial \vec{\mathbf{A}}^s}{\partial t} = \sigma \vec{\mathbf{E}}^p, \tag{1}$$

where the vector-potential $\vec{\mathbf{A}}^s$ relates with the three dimensional components of electric and magnetic fields $\vec{\mathbf{E}}^s$ and $\vec{\mathbf{B}}^s$ by the ratios $\vec{\mathbf{E}}^s = -\frac{\partial \vec{\mathbf{A}}^s}{\partial t}$ and $\vec{\mathbf{B}}^s = \nabla \times \vec{\mathbf{A}}^s$. On the remote boundaries $\partial\Omega$ of three dimensional computational domain Ω, the zero tangential components of $\vec{\mathbf{A}}^s$ are set:

$$\vec{\mathbf{A}}^s \times \vec{\mathbf{n}}\Big|_{\partial\Omega} = \vec{\mathbf{0}}, \tag{2}$$

where $\vec{\mathbf{n}}$ is the vector normal to the boundary $\partial\Omega$.

The equivalent variational formulation for Eq. (1) has a form:

$$\int_\Omega \frac{1}{\mu_0} \left(\nabla \times \vec{\mathbf{A}}^s\right) \cdot \left(\nabla \times \vec{\mathbf{\Psi}}\right) d\Omega + \int_\Omega \sigma \frac{\partial \vec{\mathbf{A}}^s}{\partial t} \vec{\mathbf{\Psi}} d\Omega = \int_\Omega \sigma \vec{\mathbf{E}}^p \cdot \vec{\mathbf{\Psi}} d\Omega, \tag{3}$$

where $\vec{\mathbf{\Psi}}(x, y, z)$ is a test vector function.

Time discretization of $\frac{\partial \vec{\mathbf{A}}^s}{\partial t}$ is performed with the use of three-point implicit scheme [20, 22].

Finite element approximation of variational Eq. (3) is performed on the hexahedral non-conforming meshes. The algorithm of these meshes generation, the methods

of calculating the local matrices as well as the algorithm of constructing the conforming basis on the non-conforming meshes are presented in papers [17, 22].

The reduction of computational costs with keeping the accuracy of numerical solutions is achieved due to grouping the sub-problems each of which corresponds to one position of the source in space and one time instance, and using the direct solvers (for example, PARDISO [15]) of the finite element system of linear algebraic equations (SLAE).

The groups of sub-problems are formed such that the SLAE matrix, which is obtained as a result of space and time discretization, is the same for all sub-problems. This allows us to perform the matrix factorization only once for all sub-problems of a group, and in order to obtain the solution of each sub-problem, the solution of two SLAE with triangle matrices needs to be carried out. For grouping in space, the finite element mesh is generated such that to provide the required solution accuracy for all source positions in a group (see, for example, the papers [5, 10, 17, 20]).

2.2. INVERSE PROBLEM SOLUTION

The inverse problem solution is based on the use of the geometric 3-D inversion [9, 11, 12, 14, 21].

Taking into account the specifics of the airborne survey, we use the geoelectrical model parameterization where it is represented by a set of subhorizontal layers each of which is divided into the block rows elongated essentially along the flight lines. For example, if we assume that the flight lines are oriented (mainly) along the x-coordinate, that unknown parameters can be x-coordinates of borders of blocks, y-coordinates of the block rows as well as values of conductivity inside each block.

The components of the vector of parameters, which describe the geoelectrical model, are found by minimizing the following functional

$$\Phi^{\alpha}(\mathbf{b}) = \sum_{i=1}^{K}\sum_{l=1}^{L}\left(\omega_{il}\delta\varepsilon_{il}(\mathbf{b})\right)^2 + \sum_{m=1}^{M}\alpha_m\left(b_m - \bar{b}_m\right)^2 \to \min_{b_m}, \tag{4}$$

where K is the number of transmitter-receiver positions, L is the number of time channels, $\delta\varepsilon_{il}(\mathbf{b})$ is the difference of theoretical ε_{il} and measured $\tilde{\varepsilon}_{il}$ values of signals in the *i*-th receiver at the *l*-th time channel, M is the number of unknown parameters, $\bar{b}_m$ is the value of the *m*-th parameter at previous iteration.

The values of the weight functions ω_{il} are chosen equal to $1/\tilde{\varepsilon}_{il}$. If $\tilde{\varepsilon}_{il}$ is lower than some tolerable limit $\bar{\varepsilon}_{il}$ defined by the level of a measurement error for each specific airborne system, then the value of the weight function is taken equal to $1/\bar{\varepsilon}_{il}$. The regularization parameters α_m are chosen adaptively during the inverse problem solution. The regularization component with parameters α_m provides the search for the parameter within tolerable limits of values thereby keeping the geometry of the structural part of the geological model and providing physical values of their conductivity.

Representing the values $\delta\varepsilon_{il}(\mathbf{b})$ as two summands of Taylor series in the vicinity of the parameter values $\bar{\mathbf{b}}$ at the previous iteration, we obtain

$$\delta\varepsilon_{il}(\mathbf{b}) \approx \delta\varepsilon_{il}(\bar{\mathbf{b}}) + \sum_{m=1}^{M} \left.\frac{\partial(\delta\varepsilon_{il})}{\partial b_m}\right|_{\mathbf{b}=\bar{\mathbf{b}}} \Delta b_m, \tag{5}$$

where $\Delta b_m = b_m - \bar{b}_m$. In order to calculate the derivatives $\frac{\partial(\delta\varepsilon_{il})}{\partial b_m}$, we solve the following vector differential equation:

$$\frac{1}{\mu_0}\nabla\times\nabla\times\vec{\mathbf{A}}^{s|m} + \sigma^m \frac{\partial\vec{\mathbf{A}}^{s|m}}{\partial t} = (\sigma^m - \sigma)\vec{\mathbf{E}}, \tag{6}$$

for the increment ∂b_m of each component of the vector of parameters.

In Eq. (6), the field $\vec{\mathbf{E}}$ is the result of the forward problem solution described in Section 2.1 for values of parameters $b_m = \bar{b}_m$ obtained at the previous iteration and defining the current distribution $\sigma(x,y,z)$. The value of the function $\sigma^m(x,y,z)$ differ from the values of the function $\sigma(x,y,z)$ only in the places where the conductivity is changed due to the increment of the parameter b_m in ∂b_m. The variational formulation and finite element approximation for Eq. (6) are constructed as well as for Eq. (1).

Using the values $\vec{\mathbf{A}}^{s|m}(x,y,z,t)$, we define the values of the derivatives of errors of signals in receivers $\frac{\partial(\delta\varepsilon_{il})}{\partial b_m} = \frac{\partial\varepsilon_{il}}{\partial b_m}$ (i. e. as $-\frac{\partial\left(\nabla\times\vec{\mathbf{A}}^{s|m}\right)}{\partial t}\frac{k_r}{\partial b_m}$, where k_r is the receiver moment).

Substituting ratio (5) in (4), we obtain

$$\tilde{\Phi}^{\alpha}(\mathbf{b}) = \sum_{i=1}^{K}\sum_{l=1}^{L}\left(\omega_{il}\left(\delta\varepsilon_{il}(\bar{\mathbf{b}}) + \sum_{m=1}^{M}\left.\frac{\partial(\delta\varepsilon_{il})}{\partial b_m}\right|_{\mathbf{b}=\bar{\mathbf{b}}}\Delta b_m\right)\right)^2 +$$

$$+\sum_{m=1}^{M}\alpha_m(\Delta b_m)^2 \to \min_{\Delta b_m}. \tag{7}$$

The minimization of (7) results in SLAE in the form

$$(\mathbf{G}+\alpha)\Delta\mathbf{b} = \mathbf{f}, \tag{8}$$

where the components of the matrix $\mathbf{G}$ and right hand side vector $\mathbf{f}$ are calculated with the use of the ratios

$$G_{ps} = \sum_{i=1}^{K}\sum_{l=1}^{L}\omega_{il}^2\frac{\partial(\delta\varepsilon_{il})}{\partial b_p}\frac{\partial(\delta\varepsilon_{il})}{\partial b_s},\ f_p = -\sum_{i=1}^{K}\sum_{l=1}^{L}\omega_{il}^2\delta\varepsilon_{il}(\mathbf{b})\frac{\partial(\delta\varepsilon_{il})}{\partial b_p},\ p,s = 1...M. \tag{9}$$

In SLAE (8), the matrix α is a diagonal matrix with elements α_m on the main diagonal. The algorithm of the adaptive choice of coefficients α_m at each iteration of the nonlinear inversion is presented in [9].

2.3. PRINCIPALS OF PARALLEL IMPLEMENTATION

We propose the parallel implementation of the inverse problem solution using the multicore PC connected by the local net (further, we call these PCs as computational nodes).

As mentioned above, all positions of the airborne system are divided into groups which contain up to 100 positions depending on the distance between the adjacent positions on the flight lines and the distance between them. The calculation for each group is carried out on a computational node.

In order to allocate the problems to a computational node, we have developed a control program, which sends data to computational nodes, controls the obtaining of results and the connection with the corresponding computational node. If any computational node is disconnected for a long time, or the numerical procedure is aborted due to any reason (for example, turning-off the PC or starting some other task requiring high computational resources), the control program restarts the calculation for the corresponding group on the other computational node. Thus, the developed control program provides fault tolerance of the system for parallelizing the inverse problem solution.

At each computational node simultaneously with the forward problem solution for the geoelectrical model, which is obtained at the current iteration of nonlinear inversion, the fields of the impact of geoelectrical model parameters are calculated for the next iteration of nonlinear inversion because their calculation requires the values of the electric field density in the volume of the recovered medium. The calculation of the fields of the impact of geoelectrical model parameters is carried out with parallelization on the cores of the corresponding computational node.

The developed approaches to the solution of forward and inverse problems in combination with the control program enable us to use heterogeneous computational systems consisting of the independent standard PCs which are easily replaced even during the inversion fulfillment.

3. NUMERICAL EXPERIMENTS

In order to perform the numerical experiments, we use three geoelectrical models. The first two models represent the layered medium with the topography in which the elevations reach 60 m for the lateral displacement of 600m. In these models the layer thickness varies from 49 m to 12 m, and, in the third model, this thickness varies from 64 m to 3 m. The first geoelectrical model does not contain lateral 3D-inhomogeneities, and the second and third models include two quite large parts with 3D-inhomogeneities of low resistivity.

Using the numerical schemes of 3D-modeling, which are described in section 2.1, for these three geoelectrical models, the airborne electrical survey data have been synthesized along 10 flight lines (profiles). The total number of airborne system positions on all flight lines is 1311. Further, we call these data “practical”. For each airborne system position, the data are synthesized at 23 time channels in the time range of 1 μs to 1 ms.

Fig. 1 shows the sections of the geoelectrical model 1 along four flight lines (flight lines are shown by light points and denoted as P1…P10). We can see the changes of the top layer thickness both along and across the flight lines.

For the data, which are synthesized for model 1, the 3D-inversion is performed. The unknown parameters are the top layer thickness in the condition that it is constant and the corresponding conductivity distribution, which suggests the equivalence of inhomogeneous layer of the constant thickness and true homogeneous layer with varying thickness. In the top layer of the initial (for 3D-inversion) model, the block structure containing 7×7 blocks (7 rows with 7 blocks in each row) is set. The vector of unknown parameters includes the *x*-coordinates of the blocks (the *x*-coordinates of the adjacent blocks are set by a single parameter), y-coordinates of the block rows (*y*-coordinates of the adjacent rows are also set by a single parameter), the conductivities inside each block, and layer thickness. The total number of parameters, which are used for recovering the geoelectrical model, is 117.

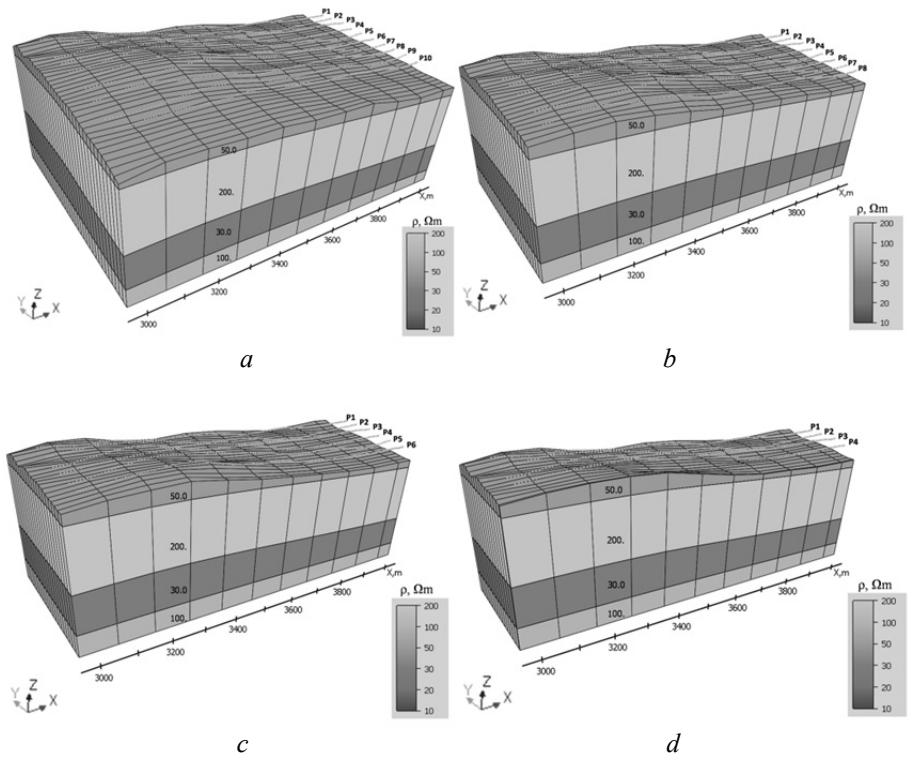

Fig. 1. The section of the geoelectrical model 1 along flight lines P10 (*a*), P8 (*b*), P6 (*c*), and P4 (*d*)

During the 3D-inversion six iterations were performed, after that the value of the residual functional

$$\Phi(\mathbf{b}) = \sum_{i=1}^{K}\sum_{l=1}^{L}\left(\omega_{il}\delta\varepsilon_{il}(\mathbf{b})\right)^2 , \tag{10}$$

became equal to 0.0198, and the values of the parameters did not significantly change (for the initial model, the residual functional is equal to 0.191). Fig. 2 shows the geoelectrical model obtained after the sixth iteration. The comparison of Figs. 1 and 2 shows that, in general, the obtained value of layer resistivity is about 50 Ωm: most of the blocks, which are deformed as a result of 3D-inversion, have the resistivity in the range of 45 to 65 Ωm which corresponds to the layer resistivity in the "true" model. As expected, the most distortion of the conductivity is seen for the blocks which are located in the vicinities of the maximal thickening and thinning of the layer in the "true" model. In these places of the equivalent model, which is obtained as a result of 3D-inversion with the constant thickness of the layer (this thickness has been obtained equal to 32.34 m), the values of the block resistivity reach 30 and 150 Ωm, respectively.

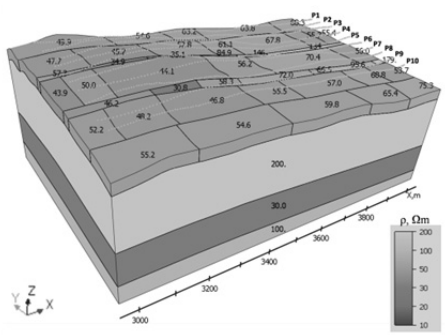

Fig. 2. The geoelectrical model obtained after the sixth iteration of 3D-inversion

The degree of the equivalence of the geoelectrical model with the constant layer thickness, which is obtained as a result of 3D-inversion, and the "true" model can be estimated using the curves of signals along the flight lines at different time channels. Figs. 3a-c show these curves obtained for the recovered model (further, we call the corresponding curves theoretical) and for the "true" model ("practical" data) at five characteristic time channels. Besides, in these figures, light solid lines show the curves which are calculated for the model with the constant thickness of the top curved (according to the relief) layer equal to 32.34 m (i.e. with the thickness taken from the recovered model) and with the top layer resistivity taken from the "true" model.

As is seen from the results shown in Fig. 3, the deviations of the "practical" and theoretical data do not exceed 5 per cent while the deviations of signals, which are calculated for the models with varied and constant thickness of the curved top layer, are significant. This is say to that, for processing practical airborne electrical survey data, these models are equivalent.

Fig. 4 shows the sections of the geoelectrical model 2 the top layer of which (unlike model 1) includes 3D-inhomogeneities with lowered resistivity. The recovered model is shown in Fig. 4. As is seen from the results, the deformed blocks of the recovered model, which are displaced to subdomains corresponding to 3D-inhomogeneities locations in the "true" model 2, have lower (relative to the layer) resistivity. However, the resistivity of the blocks, which are positioned in the zone of the layer thickening in the "true" model, has been obtained lower than in the

"true" model (the group of inhomogeneities located on the left part near flight line P4). The resistivity of the blocks, which are positioned in the zone of the layer thinning, has been obtained somewhat high (the group of inhomogeneities located on the right part near flight line P4). During the 3D-inversion nine iterations were performed, after that the value of the residual functional (10) became equal to 0.0347 (for the initial model, this value is equal to 0.221), and the parameters of the model at last two iterations did not change significantly. The thickness of the equivalent top layer has been obtained equal to 31.76 m.

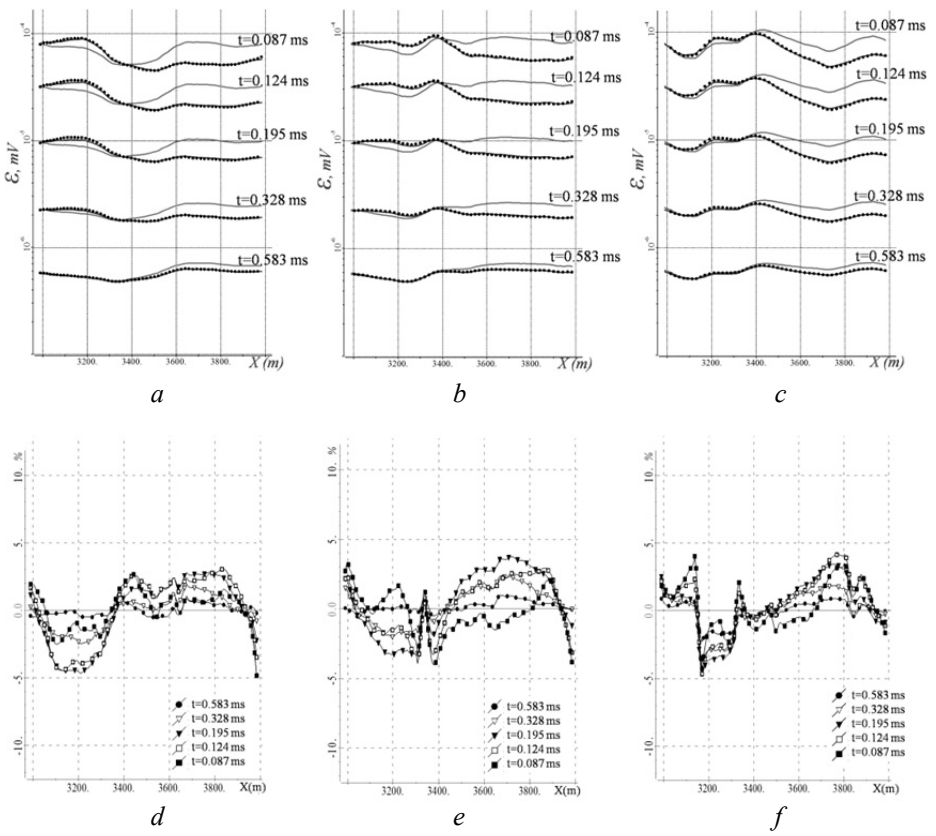

Fig. 3. The theoretical data (dark solid lines) for the model obtained at the sixth iteration, the "practical" data (black points), and the data calculated for the model with the constant thickness of the top curved (according to relief) layer equal to 32.34 m and with the top layer resistivity taken from the "true" model (light solid lines). The data are shown at five time channels along flight lines P4, P6, and P8 (Figs. *a*, *b*, *c*, respectively). The deviations of theoretical data (the recovered model) and "practical" data (the "true" model) at five time channels along flight lines P4, P6, and P8 (Figs. *d*, *e*, *f*, respectively)

Fig. 6 shows the curves, which are obtained for the recovered and "true" models, and their deviations. It can be noted, that, in this case, the deviations increases, especially at early times (the time channel $t = 0.087$ ms) and reach 7…8 %. Nevertheless, for processing the practical airborne data, these models can be recognized as equivalent as well as in the case of model 1.

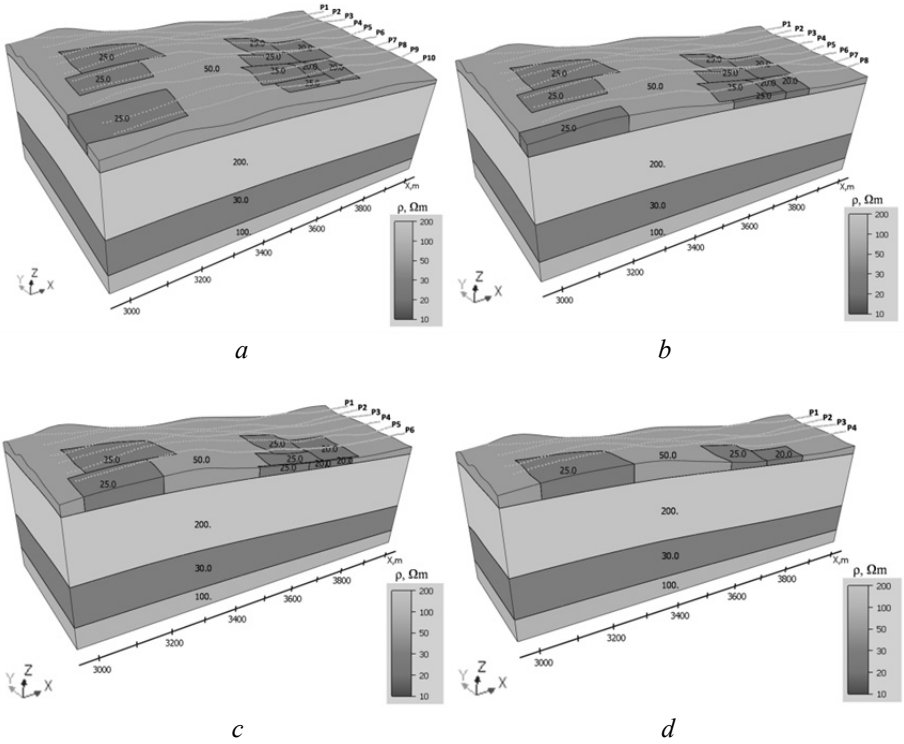

Fig. 4. The sections of the geoelectrical model 2 along flight lines P10 (*a*), P8 (*b*), P6 (*c*), and P4 (*d*)

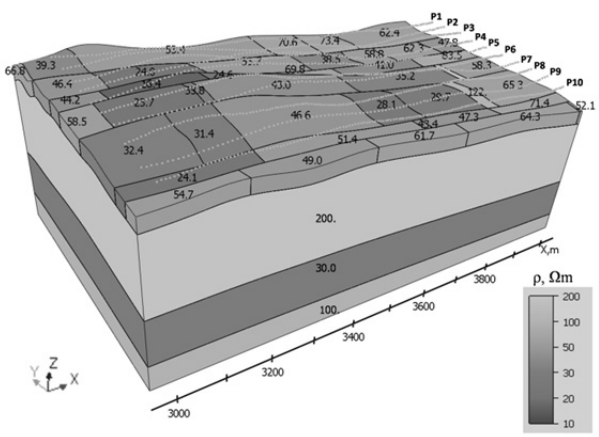

Fig. 5. The geoelectrical model obtained after the ninth iteration of 3D-inversion

Fig. 7 shows the sections of the geoelectrical model 3 the top layer of which (as well as in model 2) contains lateral 3D-inhomogeneities with lower resistivity, but in this model, the changes of the top layer thickness reach about 60 m, the recovered model is shown in Fig. 8. Fig. 9 shows the curves, which are obtained for the recovered and "true" models, and their deviations.

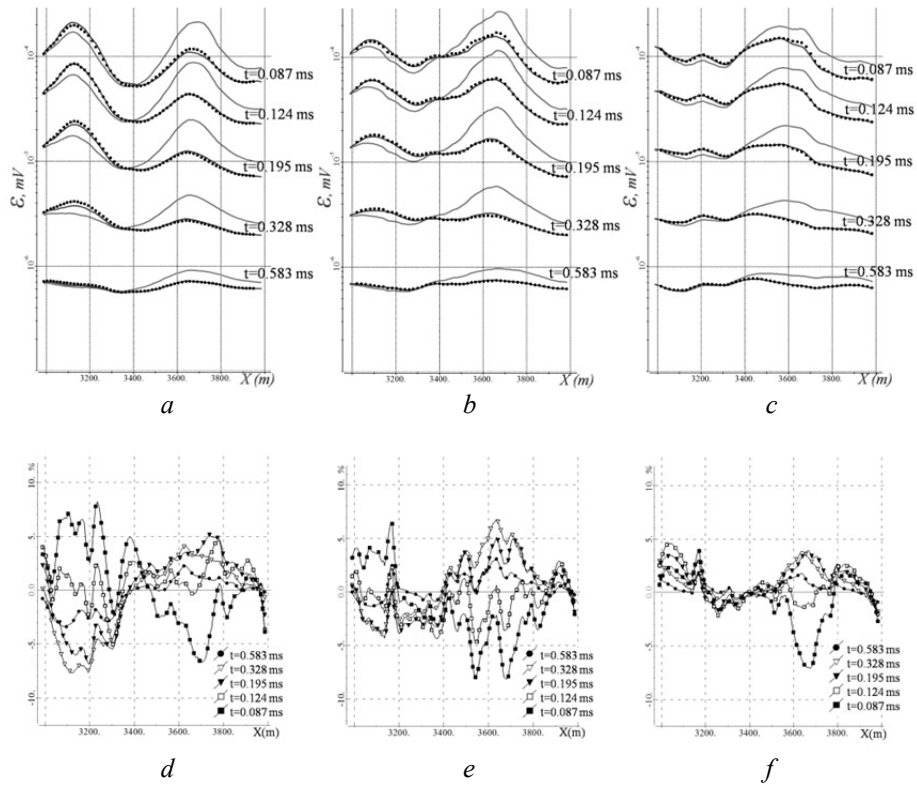

Fig. 6. The theoretical data (dark solid lines) for the model obtained at the ninth iteration, the "practical" data (black points), and the data calculated for the model with the constant thickness of the top curved (according to the relief) layer equal to 31.76 m and with inhomogeneities taken from the "true" model 2 (light solid lines). The data are shown at five time channels along flight lines P4, P6, and P8 (Figs. *a*, *b*, *c*, respectively). The deviations of theoretical data (the recovered model) and "practical" data (the "true" model) at five time channels along flight lines P4, P6, and P8 (Figs. *d*, *e*, *f*, respectively)

During the 3D-inversion eight iterations were performed, after that the value of the residual functional (10) became equal to 0.0466 (for the initial model, this value is equal to 0.354), and the parameters of the model at last two iterations did not change significantly. The thickness of the top layer was obtained equal to 45.33 m.

As is seen from the results, the deviations of the curves, which are obtained for the recovered and "true" models, reach 10…12 per cent, and the recovered model cannot be admitted as equivalent because, in this case, we can skip the target objects, which are located in the second layer and have the responses about 15…20 per cent in the measured signals, while these objects can be reliably discovered if the top layer is recovered more accurately.

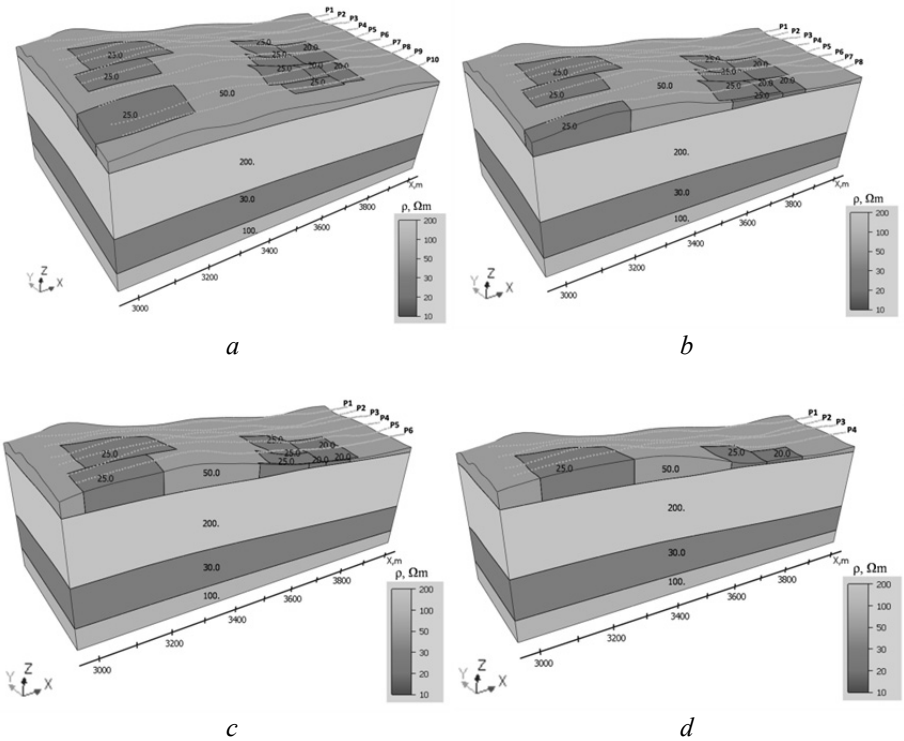

Fig. 7. The sections of the geoelectrical model 3 along flight lines P10 (*a*), P8 (*b*), P6 (*c*), and P4 (*d*)

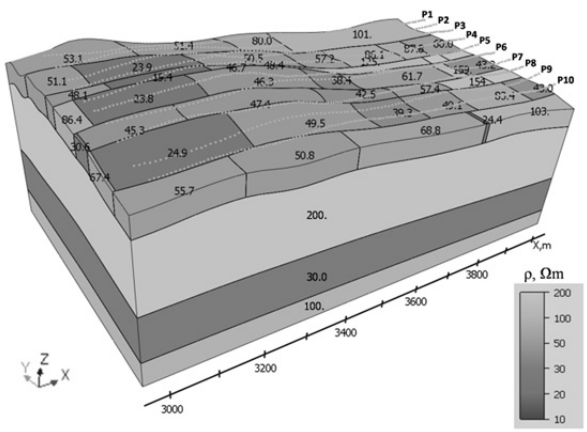

Fig. 8. The geoelectrical model obtained after the eight iteration of the 3D-inversion

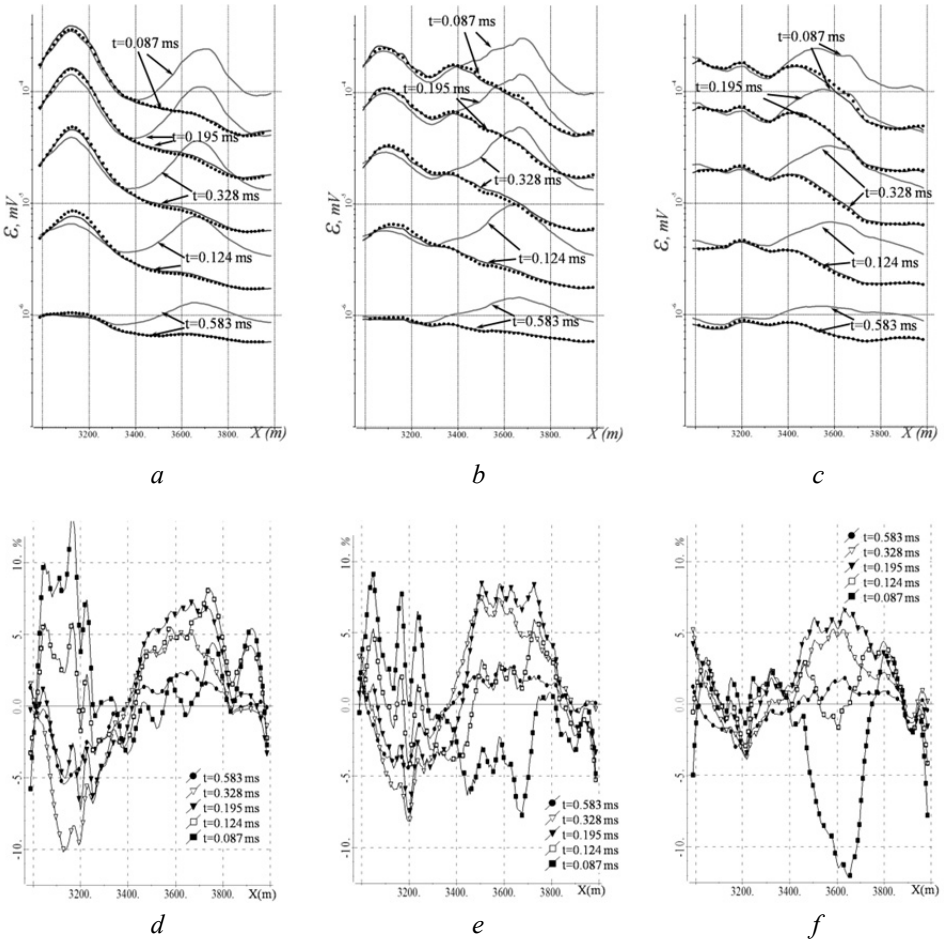

Fig. 9. The theoretical data (dark solid lines) for the model obtained at the eighth iteration, the "practical" data (black points), and the data calculated for the model with the constant thickness of the top curved (according to relief) layer equal to 45.33 m and with inhomogeneities taken from the "true" model 3 (light solid lines). The data are shown at five time channels along flight lines P4, P6, and P8 (Figs. *a*, *b*, *c*, respectively). The deviations of theoretical data (the recovered model) and "practical" data (the "true" model) at five time channels along flight lines P4, P6, and P8 (Figs. *d*, *e*, *f*, respectively)

CONCLUSIONS

On the basis of the 3D-modeling results, we can make conclusions about the parameterization of geoelectrical models for performing 3D-inversion of the airborne data in the conditions typical of the airborne electrical survey: in geological media with the topography and conductive laterally inhomogeneous top layer (which is, actually, the noise factor) overlapping the low conductive layer with target conductive bodies.

In the case, if the changes of the top layer thickness do not exceed 30…35 m, at least at the first stage of 3D-inversion, it can be found as equivalent with a constant (but recovered) thickness almost without losing the quality of detecting the target objects. Thus, for parameterization of the top layer, the vector of unknown parameters can include only the lateral borders of 3D-inhomogeneities, their conductivities, and layer thickness represented by a single parameter.

If the changes of the top layer thickness are more significant in the investigated area, the shape of the bottom border of this layer should be determined during the 3D-inversion. In this case, it can be parameterized with the use of increments of the *z*-coordinates of some control points of the spline representing this border thereby more reliably discovering the target objects in the second layer.

REFERENCES

1. Abd Allah S., Mogi T., Ito H., Jomori A., Yuuki Y., Fomenko E., Kiho K., Kaieda H., Suzuki K., Tsukuda K. Three-dimensional resistivity characterization of a coastal area: application of grounded electrical-source airborne transient electromagnetic (GREATEM) survey data from Kujukuri Beach, Japan. *Journal of Applied Geophysics*, 2013, vol. 99, pp. 1–11.

2. Andersen K.K., Kirkegaard C., Foged N., Christiansen A.V., Auken E. Artificial neural networks for removal of couplings in airborne transient electromagnetic data. *Geophysical Prospecting*, 2016, vol. 64, no. 3, pp. 741–752.

3. Dehiya R.S.A., Gupta P.K., Israil M. Interpretation of CSEM data using 2D block inversion algorithm. *22nd EM Induction Workshop*, Weimar, Germany, 2014.

4. Grayver A.V. Parallel three-dimensional magnetotelluric inversion using adaptive finite-element method. Part I. Theory and synthetic study. *Geophysical Journal International*, 2015, vol. 202, no. 1, pp. 584–603.

5. Haber E., Schwarzbach C. Parallel inversion of large-scale airborne time-domain electromagnetic data with multiple OcTree meshes. *Inverse Problems*, 2014, vol. 30, no. 5.

6. Liu Y., Yin C. 3D inversion for multipulse airborne transient electromagnetic data. *Geophysics*, 2016, vol. 81, no. 6, pp. E401–E408.

7. McMillan M.S., Schwarzbach C., Haber E., Oldenburg D.W. 3D parametric hybrid inversion of time-domain airborne electromagnetic data. *Geophysics*, 2015, vol. 80, no. 6, pp. K25–K36.

8. McMillan M.S., Schwarzbach C., Haber E., Oldenburg D.W. Multiple body parametric inversion of frequency- and time-domain airborne electromagnetic. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2016, vol. 35, pp. 846–851.

9. Mogilatov V., Goldman M., Persova M., Soloveichik Y., Koshkina Y., Trubacheva O., Zlobinskiy A. Application of the marine circular electric dipole method in high latitude Arctic regions using drifting ice floes. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, vol. 135, pp. 17–31.

10. Oldenburg D.W., Haber E., Shekhtman R. Three dimensional inversion of multisource time domain electromagnetic data. *Geophysics*, 2013, vol. 78, no. 1, pp. E47–E57.

11. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Koshkina Y.I., Vagin D.V., Trubacheva O.S. Geometrical nonlinear 3D inversion of airborne time domain EM data. *Near Surface Geoscience 2016: 1st Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining*, Barcelona, Spain, 2016.

12. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Trigubovich G.M., Tokareva M.G. Methods and algorithms for reconstructing three-dimensional distributions of electric conductivity and polarization in the medium by finite-element 3D modeling using the data of electromagnetic sounding. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2013, vol. 49, no. 3, pp. 329–343.

13. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Trigubovich G.M., Vagin D.V., Domnikov P.A. Transient electromagnetic modelling of an isolated wire loop over a conductive medium. *Geophysical Prospecting*, 2014, vol. 62, no. 5, pp. 1193–1201.

14. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Vagin D.V., Domnikov P.A., Kiselev D.S., Koshkina Y.I., Simon E.I. Multidimensional processing of the airborne EM data in the complex media. *Engineering and Mining Geophysics 2018*, Kazakhstan, Almaty, 2018.

15. Schenk O., Ğartner K. Solving unsymmetric sparse systems of linear equations with PARDISO. *Future Generation Computer Systems*, 2004, vol. 20, no. 3, pp. 475–487.

16. Singh A.D.R., Gupta P.K., Israil M. Development of block inversion algorithm and its comparison with cell inversion schemes. *22nd EM Induction Workshop*, Weimar, Germany, 2014.

17. Soloveichik Y.G., Persova M.G., Domnikov P.A., Koshkina Y.I., Vagin D.V. Finite-element solution to multidimensional multisource electromagnetic problems in the frequency domain using non-conforming meshes. *Geophysical Journal International*, 2018, vol. 212, no. 3, pp. 2159–2193.

18. Yang D., Oldenburg D.W. Three-dimensional inversion of airborne time-domain electromagnetic data with applications to a porphyry deposit. *Geophysics*, 2012, vol. 77, no. 2, pp. B23–B34.

19. Yang D., Oldenburg D.W., Haber E. 3-D inversion of airborne electromagnetic data parallelized and accelerated by local mesh and adaptive soundings. *Geophysical Journal International*, 2014, vol. 196, no. 3, pp. 1492–1507.

20. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Vagin D.V., Kiselev D.S., Kondratyev N.V., Koshkina Y.I., Trubacheva O.S. Primenenie nekonformnykh setok s shestigrannymi yacheikami dlya 3D-modelirovaniya tekhnologii aeroelektrorazvedki [Application of non-conforming meshes with hexahedral cells for 3D modelling of airborne electromagnetic technologies]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 1 (38), pp. 64–79.

21. Persova M.G., Trubacheva O.S. O podkhode k resheniyu obratnoi zadachi vyzvannoi polyarizatsii pri vosstanovlenii granits anomal'nykh po polyarizuemosti ob"ektov [On an approach to solving induced polarization inverse problems under recovery of boundaries of an object with anomalous polarizability]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 3 (28), pp. 88–98.

22. Soloveichik Yu.G., Royak M.E., Persova M.G. *Metod konechnykh elementov dlya resheniya skalyarnykh i vektornykh zadach* [The finite element method for the solution of scalar and vector problems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2007. 896 p.

23. Soloveichik Yu.G., Tokareva M.G., Persova M.G. Reshenie trekhmernykh statsionarnykh zadach elektrorazvedki na neregulyarnykh parallelepipeidal'nykh setkakh [The solution of three-dimensional stationary problems EM survey on irregular parallelepipedal grids]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2004, no. 1 (17), pp. 22–33.

Kondratyev Nikolay Vladimirovich, an assistant lecturer at the department of applied mathematics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on the development and optimizations of parallel programs, acceleration of numerical modeling on CPU and GPU devices, development and implementation of distributed calculation systems for numerical modeling. He is the author of 14 scientific papers. E-mail: kondratyev@ami.nstu.ru.

Kiselev Dmitry Sergeevich, a postgraduate student, an assistant lecturer at the department of applied mathematics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on finite element modeling. He is the author of more than 20 scientific papers. E-mail: harlequin_00@mail.ru.

Vagin Denis Vladimirovich, Candidate of Sciences (Eng.), an associate professor at the department of applied mathematics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on finite element modeling of electromagnetic fields. He is the author of more than 80 scientific papers. E-mail: vdv_wk@mail.ru

Persova Marina Gennad'evna, Doctor of Sciences (Eng.), professor, a professor at the applied mathematics department, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on finite element modeling and knowledge-intensive software for modeling and supporting technologies. She is the author of more than 150 scientific papers. E-mail: persova@ami.nstu.ru

Soloveichik Yuri Grigorievich, Doctor of Sciences (Eng.), professor, head of the department of applied mathematics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on finite element modeling and knowledge-intensive software for modeling and supporting technologies. He is the author of more than 150 scientific papers. E-mail: soloveychik@ami.nstu.ru.

Кондратьев Николай Владимирович, аспирант кафедры прикладной математики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – разработка и оптимизация параллельных программ решения СЛАУ, полученных в результате конечноэлементной аппроксимации в задачах электромагнетизма в системах с общей и разделяемой памятью. Автор и соавтор 14 научных работ. E-mail: kondratyev@ami.nstu.ru

Киселев Дмитрий Сергеевич, ассистент кафедры прикладной математики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – конечноэлементное моделирование. Автор и соавтор более 20 научных работ. E-mail: harlequin_00@mail.ru

Вагин Денис Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – конечноэлементное моделирование электромагнитных полей. Автор и соавтор более 80 научных работ. E-mail: vdv_wk@mail.ru

Персова Марина Геннадьевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной математики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – конечноэлементное моделирование и наукоемкое программное обеспечение для моделирования и сопровождения технологий. Автор и соавтор более 150 научных и учебно-методических работ. E-mail: persova@ami.nstu.ru

Соловейчик Юрий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент САН ВШ, заведующий кафедрой прикладной математики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – конечноэлементное моделирование и наукоемкое программное обеспечение для моделирования и сопровождения технологий. Автор и соавтор более 150 научных и учебно-методических работ. E-mail: soloveychik@ami.nstu.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-59-78

Исследование эквивалентности влияний переменной толщины и проводимости при трехмерной обработке данных аэроэлектроразведки в сложных средах[*]

Н.В. КОНДРАТЬЕВ[a], *Д.С. КИСЕЛЕВ*[b], *Д.В. ВАГИН*[c], *М.Г. ПЕРСОВА*[d], *Ю.Г. СОЛОВЕЙЧИК*[e]

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

[a] *kondratyev@ami.nstu.ru* [b] *harlequin_00@mail.ru* [c] *vdv_wk@mail.ru*
[d] *persova@ami.nstu.ru* [e] *soloveychik@ami.nstu.ru*

Работа посвящена проблеме обработки данных аэроэлектроразведочных работ с целью разработки рекомендаций к параметризации геологической среды для выполнения геометрических 3D-инверсий аэроданных. Исследования проводятся с использованием конечноэлементного 3D-моделирования нестационарных электромагнитных полей, возбуждаемых расположенной на вертолете установкой, в сложных средах, с последующей 3D-инверсией синтезированных аэроданных. Геоэлектрические модели, выбранные для исследований, были взяты характерными для рассмотренного класса аэроэлектроразведочных работ в средах с рельефом и проводящим, неоднородным по проводимости и толщине верхним слоем, являющимся, по сути, мешающим фактором, и расположенным под ним слабопроводящим слоем с целевыми проводящими телами. Показано, что если изменения толщины верхнего слоя не превышают 30…35 м, при проведении 3D-инверсии, как минимум на ее первом этапе, верхний слой может подбираться как эквивалентный с постоянной (но подбираемой) толщиной, т. е. при параметризации верхнего слоя в вектор искомых параметров при решении обратной задачи можно включать только латеральные границы 3D-неоднородностей, их проводимости и толщину слоя, описываемую одним параметром. Также показано, что если на изучаемой площади изменения толщины верхнего слоя являются более существенными, его нижнюю границу следует определять более детально, поскольку в противном случае вполне могут быть пропущены в следующем целевом слое поисковые объекты с откликами порядка 15…20 % от суммарных сигналов, которые при более точном восстановлении верхнего слоя могут быть достаточно уверенно выявлены.

Ключевые слова: аэроэлектроразведка, численное 3D-моделирование, геометрические 3D-инверсии, электромагнитное поле, зондирование во временной области, рельеф, эквивалентные решения, обратные задачи

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Three-dimensional resistivity characterization of a coastal area: application of grounded electrical-source airborne transient electromagnetic (GREATEM) survey data from Kujukuri Beach, Japan / S. Abd Allah, T. Mogi, H. Ito, A. Jomori, Y. Yuuki, E. Fomenko, K. Kiho, H. Kaieda, K. Suzuki, K. Tsukuda // Journal of Applied Geophysics. – 2013. – Vol. 99. – P. 1–11.

[*] *Статья получена 09 марта 2018 г.*

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (№ гранта МК-5010.2018.9).

2. Artificial neural networks for removal of couplings in airborne transient electromagnetic data / K.K. Andersen, C. Kirkegaard, N. Foged, A.V. Christiansen, E. Auken // Geophysical Prospecting. – 2016. – Vol. 64, N 3. – P. 741–752.

3. *Dehiya R.S.A., Gupta P.K., Israil M.* Interpretation of CSEM data using 2D block inversion algorithm // 22nd EM Induction Workshop. – Weimar, Germany, 2014.

4. *Grayver A.V.* Parallel three-dimensional magnetotelluric inversion using adaptive finite-element method. Part I. Theory and synthetic study // Geophysical Journal International. – 2015. – Vol. 202, N 1. – P. 584–603.

5. *Haber E., Schwarzbach C.* Parallel inversion of large-scale airborne time-domain electromagnetic data with multiple OcTree meshes // Inverse Problems. – 2014. – Vol. 30, N 5.

6. *Liu Y., Yin C.* 3D inversion for multipulse airborne transient electromagnetic data // Geophysics. – 2016. – Vol. 81, N 6. – P. E401–E408.

7. 3D parametric hybrid inversion of time-domain airborne electromagnetic data / M.S. McMillan, C. Schwarzbach, E. Haber, D.W. Oldenburg // Geophysics. – 2015. – Vol. 80, N 6. – P. K25–K36.

8. Multiple body parametric inversion of frequency- and time-domain airborne electromagnetics / M.S. McMillan, C. Schwarzbach, E. Haber, D.W. Oldenburg // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2016. – Vol. 35. – P. 846–851.

9. Application of the marine circular electric dipole method in high latitude Arctic regions using drifting ice floes / V. Mogilatov, M. Goldman, M. Persova, Y. Soloveichik, Y. Koshkina, O. Trubacheva, A. Zlobinskiy // Journal of Applied Geophysics. – 2016. – Vol. 135. – P. 17–31.

10. *Oldenburg D.W., Haber E., Shekhtman R.* Three dimensional inversion of multisource time domain electromagnetic data // Geophysics. – 2013. – Vol. 78, N 1. – P. E47–E57.

11. Geometrical nonlinear 3D inversion of airborne time domain EM data / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, Y.I. Koshkina, D.V. Vagin, O.S. Trubacheva // Near Surface Geoscience 2016: 1st Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining. – Barcelona, Spain, 2016.

12. Methods and algorithms for reconstructing three-dimensional distributions of electric conductivity and polarization in the medium by finite-element 3D modeling using the data of electromagnetic sounding / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, G.M. Trigubovich, M.G. Tokareva // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. – 2013. – Vol. 49, N 3. – P. 329–343.

13. Transient electromagnetic modelling of an isolated wire loop over a conductive medium / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, G.M. Trigubovich, D.V. Vagin, P.A. Domnikov // Geophysical Prospecting. – 2014. – Vol. 62, N 5. – P. 1193–1201.

14. Multidimensional processing of the airborne EM data in the complex media / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, P.A. Domnikov, D.S. Kiselev, Y.I. Koshkina, E.I. Simon // Engineering and Mining Geophysics 2018. – Kazakhstan, Almaty, 2018.

15. *Schenk O., Ґartner K.* Solving unsymmetric sparse systems of linear equations with PARDISO // Future Generation Computer Systems. – 2004. – Vol. 20, N 3. – P. 475–487.

16. *Singh A.D.R., Gupta P.K., Israil M.* Development of block Inversion algorithm and its comparison with cell inversion schemes // 22nd EM Induction Workshop. – Weimar, Germany, 2014.

17. Finite-element solution to multidimensional multisource electromagnetic problems in the frequency domain using non-conforming meshes / Y.G. Soloveichik, M.G. Persova, P.A. Domnikov, Y.I. Koshkina, D.V. Vagin // Geophysical Journal International. – 2018. – Vol. 212, N 3. – P. 2159–2193.

18. *Yang D., Oldenburg D.W.* Three-dimensional inversion of airborne time-domain electromagnetic data with applications to a porphyry deposit // Geophysics. – 2012. – Vol. 77, N 2. – P. B23–B34.

19. *Yang D., Oldenburg D.W., Haber E.* 3-D inversion of airborne electromagnetic data parallelized and accelerated by local mesh and adaptive soundings // Geophysical Journal International. – 2014. – Vol. 196, N 3. – P. 1492–1507.

20. Применение неконформных сеток с шестигранными ячейками для 3D-моделирования технологий аэроэлектроразведки / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Д.В. Вагин, Д.С. Киселев,

Н.В. Кондратьев, Ю.И. Кошкина, О.С. Трубачева // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2018. – № 1 (38). – С. 64–79.

21. *Персова М.Г., Трубачева О.С.* О подходе к решению обратной задачи вызванной поляризации при восстановлении границ аномальных по поляризуемости объектов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 3 (28). – С. 88–98.

22. *Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г.* Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 896 с.

23. *Соловейчик Ю.Г., Токарева М.Г., Персова М.Г.* Решение трехмерных стационарных задач электроразведки на нерегулярных параллелепипеидальных сетках // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2004. – № 1 (17). – С. 22–23.

For citation:

Kondratyev N.V., Kiselev D.S., Vagin D.V., Persova M.G., Soloveichik Yu.G. A study of equivalence of influences of varying thickness and conductivity in 3D-processing of airborne electromagnetic data in complex media. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 4 (73), pp. 59–78. doi: 10.17212/1814-1196-2018-4-59-78.

Для цитирования:

Исследование эквивалентности влияний переменной толщины и проводимости при трехмерной обработке данных аэроэлектроразведки в сложных средах / Н.В. Кондратьев, Д.С. Киселев, Д.В. Вагин, М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 4 (73). – С. 59–78. – Яз. англ. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-4-59-78.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 73, № 4, 2018, с. 79–90

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 73, No. 4, 2018, pp. 79–90

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 519.633.6, 519.642.2 DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-79-90

Комбинированный векторный метод конечных и граничных элементов для задачи распространения электромагнитного поля с учетом вихревых токов*

С.А. СИВАК[a], И.М. СТУПАКОВ[b], Н.С. КОНДРАТЬЕВА[c]

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

[a] *siwakserg@yandex.ru* [b] *istupakov@gmail.com* [c] *kondratyeva.ns@gmail.com*

Целью данной работы является исследование применимости комбинирования векторного метода конечных элементов (МКЭ) и векторного метода граничных элементов (МГЭ) для моделирования электромагнитного поля при учете наличия токов смещения. Для этого производится сравнение полученной совместной вариационной постановки с аналитическим решением на модельной задаче. Демонстрируется сходимость численного решения к точным значениям аналитического решения в заданных точках. Описан метод получения совместной вариационной постановки относительно напряженности электрического поля. Данный способ предполагает разбиение расчетной области на участки, которые моделируются при помощи либо МКЭ, либо МГЭ. Кроме того, при формулировании уравнений комбинированного метода произведен учет непрерывности касательных составляющих вектора напряженности электрического поля в сильной форме и непрерывности касательных составляющих вектора напряженности магнитного поля в слабой форме. Комбинирование указанных подходов следует производить, чтобы избежать дискретизации объема в области окружающей среды. В случае учета токов смещения используется моделирование векторными конечными элементами и решается, соответственно, вихревое уравнение с оператором rot rot. В данной работе приводится пример такого комбинирования с использованием оператора Стеклова–Пуанкаре и получено уравнение в слабой форме для комбинированного метода. Пользуясь подходом, описанным в данной статье, возможно в дальнейшем осуществлять численное моделирование беспроводной передачи электромагнитной энергии от источников с нелинейными параметрами материалов.

Ключевые слова: метод конечных элементов, метод граничных элементов, вихревые токи, скалярный потенциал, вихревое уравнение, вариационная постановка, формула Стрэттона–Чу, оператор Стеклова–Пуанкаре

---

* *Статья получена 30 апреля 2018 г.*

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-71-10203)

ВВЕДЕНИЕ

В данной статье рассматривается вопрос моделирования электромагнитного поля с учетом вихревых токов комбинированием метода конечных элементов (МКЭ) с методом граничных элементов (МГЭ). Приводится сравнение комбинированного метода с методом конечных элементов на модельной задаче, для которой известно аналитическое решение.

Векторный МГЭ применим для областей, в которых параметры среды являются кусочно-постоянными функциями, однако преимуществом МГЭ является возможность моделирования потенциально неограниченных областей и меньшее число неизвестных по сравнению с МКЭ. Векторный МКЭ позволяет моделировать подобласти, в которых значения параметров являются функциями точек этих подобластей. Возможность комбинирования этих двух подходов позволяет использовать преимущества обоих этих методов.

Ранее комбинирование конечных и граничных элементов проводилось способами, описанными в [4] и [6]. Схожий подход используется и в данной работе, однако имеет место существенное отличие: для данного метода не требуется изменение потенциала на границе между подобластями, в отличие от метода, изложенного в [4].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть Ω – это односвязная область в евклидовом пространстве $\mathbb{R}^3$, возможно, неограниченная. Из системы уравнений Максвелла в работах [1], [3] и [8] было выведено уравнение для периодического по времени поля:

$$\operatorname{rot}\frac{1}{\mu(\vec{x})}\operatorname{rot}\vec{E}(\vec{x})+\left(I\omega\sigma(\vec{x})-\omega^2\varepsilon(\vec{x})\right)\vec{E}(\vec{x})=-I\omega\vec{F}(\vec{x}) \text{ при } \vec{x}\in\Omega\subset\mathbb{R}^3, \quad (1)$$

где $\vec{E}$ – это комплекснозначный вектор напряженности; $\vec{F}$ – комплекснозначный вектор тока возбуждения; ω – циклическая частота; σ – проводимость; μ – магнитная проницаемость; ε – диэлектрическая проницаемость; I – мнимая единица. В уравнении (1) все параметры являются функциями $\vec{x}$, кроме ω. Последний параметр является константой.

Параметры среды могут не являться непрерывными функциями. Пусть область разбита на подобласти $\{\Omega_i\}_{i=1}^{N}$, где N – это число подобластей. Пусть, кроме того, пара подобластей с номерами i и j имеет общую кусочно-гладкую границу Γ_{ij}, при переходе через которую функции параметров среды, а именно μ, σ и ε, испытывают скачок.

Для того чтобы определить условия на границе Γ_{ij}, введем понятия операторов следа Дирихле γ_D^{Ω} и следа Неймана γ_N^{Ω}:

$$\gamma_D^{\Omega}\vec{E}(\vec{x})=\lim_{\vec{r}\in\Omega,\vec{r}\to\vec{x}\in\partial\Omega}\vec{n}\times\left(\vec{E}(\vec{r})\times\vec{n}\right), \quad (2)$$

$$\gamma_N^{\Omega}\vec{E}(\vec{x})=\lim_{\vec{r}\in\Omega,\vec{r}\to\vec{x}\in\partial\Omega}\operatorname{rot}\vec{E}(\vec{r})\times\vec{n}. \quad (3)$$

Определим, кроме того, след кручения R^{Ω} [7]:

$$R^{\Omega}\vec{E}\left(\vec{x}\right)=\lim_{\vec{r}\in\Omega,\vec{r}\to\vec{x}\in\partial\Omega}\vec{E}\left(\vec{r}\right)\times\vec{n}. \tag{4}$$

Если аргументы функций параметров среды лежат в подобласти с индексом i, то соответствующие значения параметров указываются с индексом (например, μ_i, σ_i и ε_i). В этих обозначениях условия на Γ_{ij} определяются следующим образом [1–3]:

$$\gamma_D^{\Omega_i}\vec{E}\left(\vec{x}\right)\Big|_{x\in\Gamma_{ij}}=\gamma_D^{\Omega_j}\vec{E}\left(\vec{x}\right)\Big|_{x\in\Gamma_{ij}}, \tag{5}$$

$$\frac{1}{\mu_i\left(\vec{x}\right)}\gamma_N^{\Omega_i}\vec{E}\left(\vec{x}\right)\Big|_{x\in\Gamma_{ij}}=-\frac{1}{\mu_j\left(\vec{x}\right)}\gamma_N^{\Omega_j}\vec{E}\left(\vec{x}\right)\Big|_{x\in\Gamma_{ij}}. \tag{6}$$

Знак минус в правой части (6) означает противоположность направления внешних нормалей на общей границе Γ_{ij} соответствующих смежных подобластей.

Заметим, что при решении задачи МКЭ решение уравнения (1) предполагается искать в пространстве $H(\mathrm{rot},\Omega)$. Согласно [15] это пространство определяется следующим образом:

$$H(\mathrm{rot},\Omega)=\left\{\vec{F}:\int_{\Omega}\left\|\vec{F}\right\|_{\mathbb{R}^3}d\Omega<\infty,\ \int_{\Omega}\left\|\mathrm{rot}\,\vec{F}\right\|_{\mathbb{R}^3}d\Omega<\infty\right\}. \tag{7}$$

Обозначим образы следа кручения и следа Дирихле соответственно $H_{\|}^{-1/2}\left(\mathrm{div}_{\Gamma_i},\Gamma_i\right)$ и $H_{\perp}^{-1/2}\left(\mathrm{rot}_{\Gamma_i},\Gamma_i\right)$, как это сделано в работе [1], причем отображения

$$R^{\Omega_i}:H(\mathrm{rot},\Omega_i)\to H_{\|}^{-1/2}\left(\mathrm{div}_{\Gamma_i},\Gamma_i\right), \tag{8}$$

$$\gamma_D^{\Omega_i}:H(\mathrm{rot},\Omega_i)\to H_{\perp}^{-1/2}\left(\mathrm{rot}_{\Gamma_i},\Gamma_i\right) \tag{9}$$

являются сюръекциями. Нормы в пространствах $H_{\|}^{-1/2}\left(\mathrm{div}_{\Gamma_i},\Gamma_i\right)$ и $H_{\perp}^{-1/2}\left(\mathrm{rot}_{\Gamma_i},\Gamma_i\right)$ определены, например, в работе [1].

2. ОПЕРАТОР СТЕКЛОВА–ПУАНКАРЕ: ЗАДАЧИ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Пусть для некоторой односвязной подобласти Ω_i все параметры среды являются константами. Определим волновое число k_i по формуле

$$k_i=\sqrt{-\omega^2\varepsilon_i\mu_i+I\omega\sigma_i\mu_i}, \tag{10}$$

где I – это мнимая единица. Пусть в подобласти Ω_i уравнение (1) является однородным. Обозначим границу указанной области Γ_i, тогда согласно [1], [7] и [8] решение уравнения (1) может быть представлено в виде интегрального разложения по формуле Стрэттона–Чу (11):

$$\vec{E}\left(\vec{x}\right) = \mathrm{rot} \int\limits_{\vec{y}\in\Gamma_i} G_{k_i}\left(\vec{x},\vec{y}\right) R^{\Omega_i} \vec{E}\left(\vec{y}\right) dS + \int\limits_{\vec{y}\in\Gamma_i} G_{k_i}\left(\vec{x},\vec{y}\right) \gamma_N^{\Omega_i} \vec{E}\left(\vec{y}\right) dS + ,$$

$$+\nabla_x \int\limits_{\vec{y}\in\Gamma_i} G_{k_i}\left(\vec{x},\vec{y}\right) \vec{E}\left(\vec{y}\right) \vec{n} dS \quad \vec{x}\in\Omega_i . \tag{11}$$

где $\vec{y}$ – это связанная переменная интегрирования, а дифференциальный оператор rot вычисляется по переменной $\vec{x}$. Вектор $\vec{n}$ – это внешняя относительно Ω_i нормаль к Γ_i в точке $\vec{y}$. Функция G_{k_i} выражается в виде (12):

$$G_{k_i}\left(\vec{r},\vec{\rho}\right) = \frac{e^{-k_i\left\|\vec{r}-\vec{\rho}\right\|}}{4\pi\left\|\vec{r}-\vec{\rho}\right\|} , \tag{12}$$

где норма понимается в смысле евклидового пространства в $\mathbb{R}^3$.

Для получения значения напряженности электрического поля на границе области и в точках, близких к этой границе, необходимо вычислять несобственные интегралы из (11) с учетом особенности в подынтегральном выражении. Методы, позволяющие это осуществить, описаны в работах [5], [11], [12] и [13].

Для пары функций $\vec{f}\left(\vec{y}\right)$, $\vec{g}\left(\vec{y}\right)$ определим скалярное произведение на Γ_i по формуле

$$\left\langle \vec{f},\vec{g}\right\rangle_\Gamma = \int\limits_\Gamma \overline{\vec{f}}\cdot\vec{g} d\Gamma . \tag{13}$$

Применением следа Неймана (3) к выражению (11) и использованием нетривиальных преобразований, описанных в [1], можно связать след Дирихле (5) и след Неймана в слабой форме:

$$\left\langle S_{k_i}\left[\gamma_D^{\Omega_i}\vec{E}\right],\vec{\xi}\right\rangle_{\Gamma_i} = \left\langle \gamma_N^{\Omega_i}\vec{E},\vec{\xi}\right\rangle_{\Gamma_i} , \ \vec{\xi}\in H_\perp^{-1/2}\left(\mathrm{rot}_{\Gamma_i},\Omega_i\right). \tag{14}$$

В последнем выражении S_{k_i} является оператором Стеклова–Пуанкаре.

3. КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД

Комбинированный метод заключается в том, что вся расчетная область делится на подобласти, в каждой из которых задача решается либо МКЭ, либо МГЭ. Обозначим Ω_j область, в которой задача решается МКЭ, а через Ω_i – МГЭ. Пусть эти области являются смежными по кусочно-гладкой поверхности Γ_{ij}.

Запишем уравнение (1) для МКЭ подобласти в слабой форме для подобласти Ω_j, следуя [4] и [6]:

$$\int_{\Omega_j} \frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\vec{E}\cdot\operatorname{rot}\vec{\psi} + i\omega\sigma\vec{E}\cdot\vec{\psi}d\Omega = -i\omega\int_{\Omega_j}\vec{F}\cdot\vec{\psi}d\Omega + \left\langle \frac{1}{\mu}\gamma_N^{\Omega_j}\vec{E},\ \vec{\psi}\right\rangle_{\partial\Omega_j}, \quad (15)$$

где $\vec{\psi}\in H\left(\operatorname{rot},\Omega_j\right)$.

На общем участке границы Γ_{ij} внешние нормали смежных подобластей направлены в разные стороны, поэтому связь (6) в слабой форме имеет вид

$$\left\langle \frac{1}{\mu}\gamma_N^{\Omega_i}\vec{E}\left(\vec{x}\right),\ \vec{\xi}\right\rangle_{\Gamma_{ij}} = -\left\langle \frac{1}{\mu}\gamma_N^{\Omega_j}\vec{E}\left(\vec{x}\right),\ \gamma_D^{\Omega_j}\vec{\psi}\right\rangle_{\Gamma_{ij}}. \quad (16)$$

Теперь, выражая левую часть (16) через (14) и правую часть через (15), получим

$$\begin{gathered}\int_{\Omega_j} \frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\vec{E}\cdot\operatorname{rot}\vec{\psi} + i\omega\sigma\vec{E}\cdot\vec{\psi}d\Omega + \left\langle S_{k_i}\left[\gamma_D^{\Omega_i}\vec{E}\right],\ \gamma_D^{\Omega_j}\vec{\psi}\right\rangle_{\Gamma_i} = -i\omega\int_{\Omega_j}\vec{F}\cdot\vec{\psi}d\Omega,\\ \gamma_D^{\Omega_j}\vec{\psi}\Big|_{\Gamma_{ij}} \neq 0,\quad \gamma_D^{\Omega_j}\vec{\psi}\Big|_{\Omega_j\setminus\Gamma_{ij}} = 0,\quad \gamma_D^{\Omega_j}\vec{\psi}\in H_\perp^{-1/2}\left(\operatorname{rot}_{\Gamma_i},\Omega_i\right).\end{gathered} \quad (17)$$

Для оставшихся участков границ уравнения сохраняют свой вид:

$$\begin{gathered}\left\langle S_{k_i}\left[\gamma_D^{\Omega_i}\vec{E}\right],\ \vec{\xi}\right\rangle_{\Gamma_i} = \left\langle \gamma_N^{\Omega_i}\vec{E},\ \vec{\xi}\right\rangle_{\Gamma_i},\quad \vec{\xi}\in H_\perp^{-1/2}\left(\operatorname{rot}_{\Gamma_i},\ \Omega_i\right),\quad \vec{\xi}\Big|_{\Gamma_{ij}} = 0,\\ \int_{\Omega_j} \frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\vec{E}\cdot\operatorname{rot}\vec{\psi} + i\omega\sigma\vec{E}\cdot\vec{\psi}d\Omega = -i\omega\int_{\Omega_j}\vec{F}\cdot\vec{\psi}d\Omega + \left\langle \frac{1}{\mu}\gamma_N^{\Omega_j}\vec{E},\ \vec{\psi}\right\rangle_{\partial\Omega_j},\end{gathered} \quad (18)$$

$$\gamma_D^{\Omega_j}\vec{\psi}\Big|_{\Gamma_{ij}} = 0. \quad (19)$$

Уравнения (17)–(19) позволяют комбинировать уравнения МКЭ и МГЭ подобластей, при этом уравнение (17) позволяет учесть условие (6) в слабой форме.

Далее представим $\vec{E}$ и $\gamma_D^{\Omega_i}\vec{E}$ в виде разложения по базисам соответствующих дискретных подпространств пространств $H(\operatorname{rot},\ \Omega_j)$ и $H_\perp^{-1/2}\left(\operatorname{rot}_{\Gamma_i},\ \Omega_i\right)$:

$$\vec{E} = \sum_i \alpha_i\vec{\psi}_i,\quad \vec{\psi}_i\in H(\operatorname{rot},\ \Omega_j),\quad \gamma_D\vec{E} = \sum_i \beta_i\vec{\xi}_i,\quad \vec{\xi}_i\in H_\perp^{1/2}(\operatorname{rot}_\Gamma,\ \Omega_i). \quad (20)$$

Из сюръективности (9) следует, что на части общей границы Γ_{ij} можно выбрать $\gamma_D^{\Omega_j}\vec{\psi}_k = \vec{\xi}_m$, и соответствующие коэффициенты разложения приравниваются, $\alpha_k = \beta_m$, тем самым удовлетворяется условие (5) в сильной форме.

4. СРАВНЕНИЕ С АНАЛИТИЧЕСКИМ РЕШЕНИЕМ НА МОДЕЛЬНОЙ ЗАДАЧЕ

При программной реализации данного комбинированного подхода использовался неполный векторный базис, описанный, например, в работе [6]. Построение этого векторного базиса осуществляется на тетраэдрах и треугольниках соответственно для МКЭ и МГЭ частей. Несмотря на отличие в размерностях объектов (треугольник для МГЭ и тетраэдр для МКЭ), для которых строится базис, соответствующие функции тем не менее могут быть записаны единообразным способом:

$$\vec{\psi}_p\left(\vec{x}\right) = L_{i(p)}\left(\vec{x}\right)\operatorname{grad} L_{j(p)} - L_{j(p)}\left(\vec{x}\right)\operatorname{grad} L_{i(p)}. \qquad (21)$$

В формуле (18) номер p базисной функции ψ равен номеру соответствующего ребра, с которым функция может быть ассоциирована. Номера i и j – это номера вершин соответствующего ребра, функции L_i – это так называемые L-координаты, которые задаются на элементе, имеющем ребро p. Эти функции линейны и имеют свойство равняться единице в вершине с номером i и нулю во всех остальных вершинах элемента. Выбор элемента для построения базиса зависит от того, в какой элемент попала точка x. В случае, если этот элемент тетраэдр, функции L зависят от трех параметров, а в случае треугольника – от двух. Можно показать, пользуясь определением (2), что вид этих функций для треугольника не меняется.

Расчетная область для тестирования представляет собой цилиндрический сектор и разделяется на две подобласти: область источника тока и область окружающей среды. В области источника задается вектор стороннего тока, z-компонента которого равна единице. Подразбиение области на подобласти расчета производится при помощи параметров r = 0.01 м и R = 0.5 м; неравенство $x^2 + y^2 \le r^2$ определяет область источника тока, неравенство $r^2 \le x^2 + y^2 \le R^2$ – область среды, x и y – это координаты точек на плоскости OXY. Высота цилиндрического сектора H постоянна и равна 0.001. Координата z в этих подобластях меняется в пределе от $-H/2$ до $H/2$. Величина угла цилиндрического сектора равна $\pi/6$. Схематический пример деления на подобласти показан на рис. 1: часть, соответствующая сетке проводника, выделена черным контуром, остальная часть сетки соответствует области воздуха.

На границе области по оси OZ заданы *первые* однородные краевые условия вида $R^{\Omega}\vec{E}\left(\vec{x}\right) = 0$ так же, как и на удалении, т. е. на границе $x^2 + y^2 = R^2$. По бокам цилиндрической области заданы вторые однородные краевые условия вида $\gamma_N^{\Omega}\vec{E} = 0$, обеспечивающие радиальную симметричность решения.

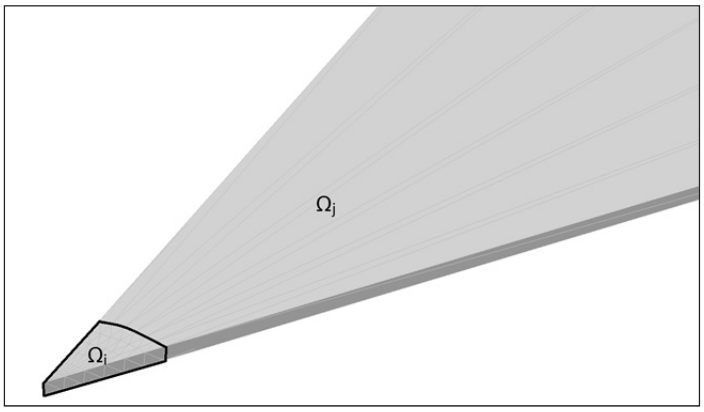

Рис. 1. Пример разбиения на подобласти

Fig. 1. Example of partition into subdomains

Известно аналитическое решение для данной задачи в области окружающей среды:

$$E_z(x,y) = J_0\left(-Ik\sqrt{x^2+y^2}\right)C_1 + Y_0\left(-Ik\sqrt{x^2+y^2}\right)C_2\,, \tag{22}$$

где функции J_0 и Y_0 – это функции Бесселя первого и второго рода соответственно. В данном тестовом примере коэффициенты C_1 и C_2 равны соответственно 2.58148e-11 и –9.81551e-11, а k – это волновое число, которое в нашем случае равно 20.95851.

Значения коэффициентов получены следующим образом: в подобласти источника решение представимо в виде

$$E_z(x,y) = J_0\left(-Ik\sqrt{x^2+y^2}\right)C_0 + \frac{1}{k^2}\,, \tag{23}$$

причем функция Бесселя Y_0 не участвует в формировании решения, поскольку бесконечно растет в точке $x = 0$, $y = 0$. Используя равенство нулю первых краевых условий на удалении и соотношения (5) и (6), имеем систему линейных уравнений относительно C_0, C_1 и C_2:

$$\frac{1}{k^2} + C_0 J_0(-krI) = C_1 J_0(-krI) + C_2 Y_0(-krI)\,, \tag{24}$$

$$C_0 J'_0(-krI) = C_1 J'_0(-krI) + C_2 Y'_0(-krI)\,, \tag{25}$$

$$0 = C_1 J_0(-krI) + C_2 Y_0(-krI)\,, \tag{26}$$

которая и определяет значения C_1 и C_2. Коэффициент C_0 в выражении (23) равен 3.02251e-09.

Указанный цилиндрический сектор приближается сеткой из тетраэдральных элементов для тех подобластей, для которых расчет производится МКЭ, и сеткой из треугольников, для которых производится расчет МГЭ. Параметры разбиения сетки следующие: N_α – число разбиений угла сектора, N_r – число подразбиений области с источником тока вдоль радиальных

направлений, N_R – число подразбиений области среды вдоль радиальных направлений.

На рис. 2 изображен пример такой сетки на границе цилиндрического сектора. Расчет МГЭ производится при использовании только сетки, заданной на поверхности.

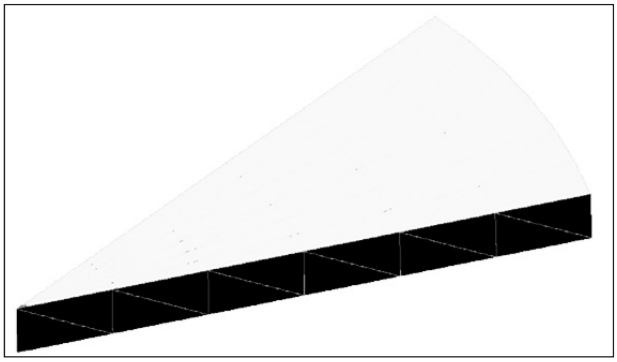

Рис. 2. Пример сетки цилиндрического сектора

Fig. 2. An example of a cylindrical sector grid

На рис. 3 изображены графики амплитуды *z*-компоненты вектора напряженности *E* (с размерностью [В/м]), полученной различными методами расчета, в зависимости от расстояния от точек, расположенных на центральной прямой цилиндрического сектора, до начала координат. График «МКЭ и МГЭ» иллюстрирует работу комбинированного метода (в этом случае область окружающей среды представлена поверхностной сеткой), график «МКЭ» иллюстрирует работу только метода конечных элементов (в этом случае объемная сетка используется для всех подобластей). Кроме того, на том же рисунке представлен график аналитического решения. На рис. 4 изображен аналогичный график, параметры разбиения сетки расчетной области которого увеличены в два раза.

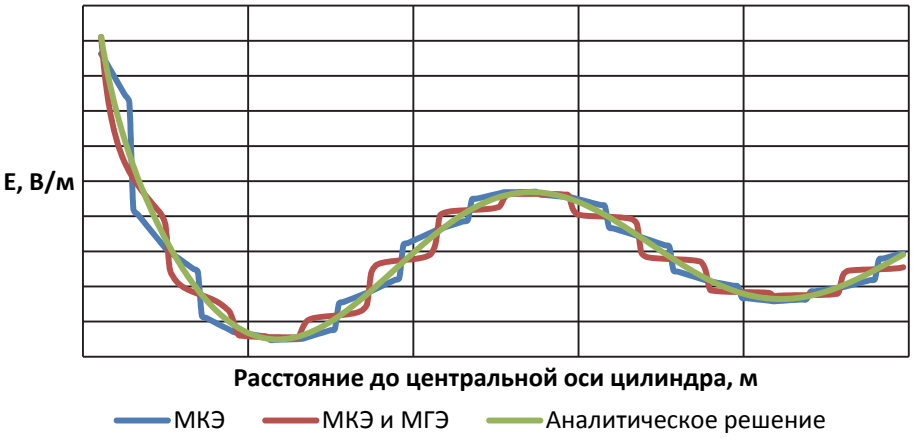

Рис. 3. График решений задачи, полученных различными методами расчета, с параметрами сетки области: $N_\alpha = 12$, $N_{vol} = 12$, $N_{air} = 12$

Fig. 3. Graph of problem solutions obtained by various methods of calculation with the parameters of the area grid: $N_\alpha = 12$, $N_{vol} = 12$, $N_{air} = 12$

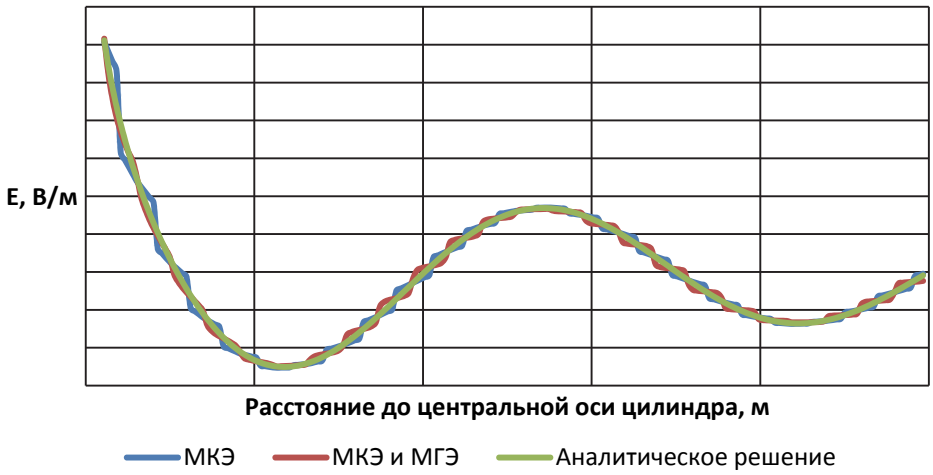

Рис. 4. График решений задачи, полученных различными методами расчета, с параметрами сетки области: $N_\alpha = 24$, $N_{vol} = 24$, $N_{air} = 24$

Fig. 4. Graph of problem solutions obtained by various methods of calculation with the parameters of the area grid: $N_\alpha = 24$, $N_{vol} = 24$, $N_{air} = 24$

Вычислим для графиков среднее отклонение d по формуле

$$d = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|E_i^z - e_i^z\right| ,$$

где E_i^z – значение z-компоненты вектора аналитического решения уравнения (1), полученного в i-й точке на прямой; e_i^z – z-компонента вектора решения, полученного одним из двух численных методов, в той же точке; N – количество точек на прямой.

Средние отклонения от аналитического решения для подразбиений, приведенных на рис. 3 и 4, представлены в таблице.

Отклонения от аналитического решения (В/м)

Deviations from the analytical solution (V/m)

Тип подразбиения	МКЭ	Комбинирование метода
$N_\alpha = 12$, $N_{vol} = 12$, $N_{air} = 12$	3.85E-12	4.16E-12
$N_\alpha = 24$, $N_{vol} = 24$, $N_{air} = 24$	1.86E-12	1.56E-12

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный комбинированный подход показал сходимость на модельной задаче. Для тестирования данной постановки использовался плотный формат хранения матрицы оператора Стеклова–Пуанкаре. Чтобы уменьшить потребление памяти, вызванное наличием плотных матриц, следует воспользоваться технологиями, позволяющими обеспечить более экономный расход

этого ресурса. В частности, такими технологиями являются использование блочного вейвлетного преобразования [9] и применение быстрых мультиполей [10, 14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Breuer J.* Schnelle Randelementmethoden zur Simulation von elektrischen Wirbelstrom feldern sowie ihrer Warmeproduktion und Kuhlung / Universität Stuttgart. – Stuttgart, 2005. – 149 p.

2. *Börm S., Ostrowski J.* Fast evaluation of boundary integral operators arising from an eddy current problem // Journal of Computational Physics. – 2003. – Vol. 193. – P. 67–85.

3. *Ostrowski J.* Boundary element methods for inductive hardening / der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen. – Tübingen, 2003. – P. 23–51.

4. *Royak M., Stupakov I.M., Kondratyeva N.S.* Coupled vector FEM and scalar BEM formulation for eddy current problems // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2016): proceedings, Novosibirsk, 3–6 October 2016. – Novosibirsk, 2016. – Vol. 1, pt. 2. – P. 330–335.

5. *Rjasanow S.*, *Steinbach O.* The fast solution of boundary integral equations. – New York, NY: Springer, 2007. – 291 p.

6. *Bossavit A.* The computation of eddy-currents, in dimension 3, by using mixed finite elements and boundary elements in association // Mathematical and Computer Modelling. – 1991. – Vol. 15, N 3. – P. 33–42.

7. *Hipmair R.* Boundary element methods for eddy current computation // Boundary element analysis: mathematical aspects and applications. – Berlin; London: Springer, 2007. – P. 213–248. – (Lecture notes in applied and computational mechanics; vol. 29).

8. *Stratton J., Chu L.* Diffraction theory of electromagnetic waves // Physical Review. – 1939. – Vol. 56. – P. 99–107.

9. On the block wavelet transform applied to the boundary element method / H. Bucher, L. Wrobel, W. Mansur, C. Magluta // Engineering Analysis with Boundary Elements. – 2004. – Vol. 28 (6). – P. 571–581.

10. *Cheng H., Greengard L., Rokhlin V.* A fast adaptive multipole algorithm in three dimensions // Journal of Computational Physics. – 1999. – Vol. 155. – P. 468–498.

11. *Sivak S.* Boundary element method for eddy current problem // 12th International Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering: proceedings APEIE-2014. – Novosibirsk, 2014. – Vol. 1. – P. 207–214.

12. *Beer G., Smith I., Duenser C.* The boundary element method with programming: for engineers and scientists. – Wien: Springer-Verlag, 2008. – 494 p.

13. *Botha M.* A family of augmented Duffy transformations for near-singularity cancellation quadrature // IEEE Transactions of Antennas and Propagation. – 2013. – Vol. 61. – P. 3123–3134.

14. *Gumerov N., Duraiswami R.* Fast multipole methods for the Helmholtz equation in three dimensions. – Amsterdam: Elsevier, 2008. – 551 p. – (Elsevier Series in Electromagnetism).

15. *Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г.* Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 896 с.

Сивак Сергей Андреевич, аспирант кафедры прикладной математики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – численное моделирование распространения электромагнитных и тепловых полей. E-mail: siwakserg@yandex.ru

Ступаков Илья Михайлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры прикладной математики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – численное моделирование электромагнитных полей. E-mail: istupakov@gmail.com

Кондратьева Наталья Сергеевна, младший научный сотрудник кафедры прикладной математики Новосибирского государственного технического университета. Основ-

ное направление научных исследований – численное моделирование электромагнитных полей. E-mail: kondratyeva.ns@gmail.com

Siwak Sergei Andreevich, a postgraduate student at the department of applied mathematics. The main field of his research is numerical modeling of electric and thermal field propagation. E-mail: siwakserg@yandex.ru

Stupakov Ilya Mikhailovich, PhD (Eng.), a senior research worker an associate professor at the department of applied mathematics. The main field of his research is numerical modeling of electromagnetic fields. E-mail: istupakov@gmail.com

Kondtatieva Natalia Sergeevna, a junior research worker at the department of applied mathematics. The main field of his research is numerical modeling of electromagnetic fields. E-mail: istupakov@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-79-90

A combined vector method of finite and boundary elements for simulating electromagnetic filed propagation considering an eddy current model[*]

S.A. SIVAK[a], *I.M. STUPAKOV*[b], *N.S. KONDRATIEVA*[c]

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] *siwakserg@yandex.ru* [b] *istupakov@gmail.com* [c] *kondratyeva.ns@gmail.com*

Abstract

This work is devoted to the application of the Finite Element Method (FEM) coupled with the Boundary Element Method (BEM) for the purpose of electromagnetic field simulation using an eddy current model. Therefore the combined derived variational problem is numerically compared with the analytical solution in this paper. The paper also shows the convergence of the numerical solution to the corresponding analytical values for the specific points of the computational domain. The method of deriving a coupled problem is described relative to the electric field strength. The essence of this method is partitioning of the computational domain into parts and each part must be simulated by either FEM or BEM techniques. In addition, the continuity of tangential vector field components of electric field strength in a strong form and magnetic field strength in a weak form is also taken into account by formulating the equations of the coupled approach. The coupled approach may be beneficial when one does not construct a volume mesh for the environment domain. In the case of eddy currents being involved in the computation, the vector FEM elements must be used and an eddy current equation with the rot-rot operator must be solved. This paper presents an example of such coupling y using the Steklof-Poincare operator for which a weak form of the corresponding equation is derived to obtain the coupled method. Using the presented approach one may simulate, for instance, a wireless transmission of electro-magnetic energy with sources having non-linear properties.

Keywords: the Finite Element Method, the Boundary Element Method, the Eddy Current Model, scalar potentials, vector potentials, the Eddy Current Equation, variational formulation, the Stratton-Chu decomposition, the Steklof-Poincare operator

REFERENCES

1. Breuer J. *Schnelle Randelementmethoden zur Simulation von elektrischen Wirbelstrom feldern sowie ihrer Warmeproduktion und Kuhlung*. Universität Stuttgart, 2005. 149 p.

[*] *Received 30 April 2018.*

The research was fully supported by the Russian Science Foundation grant (project 17-71-10203).

2. Börm S., Ostrowski J. Fast evaluation of boundary integral operators arising from an eddy current problem. *Journal of Computational Physics*, 2003, vol. 193, pp. 67–85.

3. Ostrowski J. *Boundary element methods for inductive hardening*. Der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen, 2003, pp. 23–51.

4. Royak M., Stupakov I.M., Kondratieva N.S. Coupled vector FEM and scalar BEM formulation for eddy current problems. *13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2016)*: proceedings, Novosibirsk, 3–6 October 2016, vol. 1, pt. 2, pp. 330–335.

5. Rjasanow S., Steinbach O. *The fast solution of boundary integral equations*. New York, NY, Springer, 2007. 291 p.

6. Bossavit A. The computation of eddy-currents, in dimension 3, by using mixed finite elements and boundary elements in association. *Mathematical and Computer Modelling*, 1991, vol. 15, no. 3, pp. 33–42.

7. Hipmair R. Boundary element methods for eddy current computation. *Boundary Element Analysis: Mathematical Aspects and Applications*. *Lecture notes in applied and computational mechanics*, vol. 29. Berlin, London, Springer, 2007, pp. 213–248.

8. Stratton J., Chu L. Diffraction theory of electromagnetic waves. *Physical Review*, 1939, vol. 56, pp. 99–107.

9. Bucher H., Wrobel L., Mansur W., Magluta C. On the block wavelet transform applied to the boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2004, vol. 28 (6), pp. 571–581.

10. Cheng H., Greengard L., Rokhlin V. A fast adaptive multipole algorithm in three dimensions. *Journal of Computational Physics*, 1999, vol. 155, pp. 468–498.

11. Sivak S. Boundary element method for eddy current problem. *12th International Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering*: proceedings APEIE-2014, Novosibirsk, 2014, pp. 207–214.

12. Beer G., Smith I., Duenser C. *The boundary element method with programming: for engineers and scientists*. Wien, Springer-Verlag, 2008. 494 p.

13. Botha M. A family of augmented Duffy transformations for near-singularity cancellation quadrature. *IEEE Transactions of Antennas and Propagation*, 2013, vol. 61, pp. 3123–3134.

14. Gumerov N., Duraiswami R. *Fast multipole methods for the Helmholtz equation in three dimensions*. *Elsevier Series in Electromagnetism*. Amsterdam, Elsevier, 2008. 551 p.

15. Soloveichik Yu.G., Royak M.E., Persova M.G. *Metod konechnykh elementov dlya resheniya skalyarnykh i vektornykh zadach* [Finite element method to the scalar and vector problems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2007. 896 p.

Для цитирования:

Сивак С.А., Ступаков И.М., Кондратьева Н.С. Комбинированный векторный метод конечных и граничных элементов для задачи распространения электромагнитного поля с учетом вихревых токов // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 4 (73). – С. 79–90. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-4-79-90.

For citation:

Sivak S.A., Stupakov I.M., Kondratieva N.S. Kombinirovannyi vektornyi metod konechnykh i granichnykh elementov dlya zadachi rasprostraneniya elektromagnitnogo polya s uchetom vikhrevykh tokov [A combined vector method of finite and boundary elements for simulating electromagnetic filed propagation considering an eddy current model]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 4 (73), pp. 79–90. doi: 10.17212/1814-1196-2018-4-79-90.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 73, № 4, 2018, с. 91–100

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 73, No. 4, 2018, pp. 91–100

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК004.4`22

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-91-100

Использование сетей Петри при проектировании архитектуры программного продукта для анализа данных с помощью нейронных сетей*

В.А. ХАРАХИНОВ[a], С.С. СОСИНСКАЯ[b]

664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет

[a] *tes4obse@mail.ru* [b] *sosinskaya@mail.ru*

В статье рассматривается этап проектирования, разрабатываемого авторами, программного комплекса, реализующего процессы кластеризации и классификации данных на основе искусственных нейронных сетей с предварительным сокращением размерности (редуцированием) пространства признаков. Этот этап является одним из важнейших при разработке программного продукта. Практически все современные программные комплексы характеризуются большим разнообразием взаимодействующих программных модулей, что, в свою очередь, увеличивает сложность на этапе проектирования современных программ. На этом этапе разработчики программных продуктов используют различные методы. В статье рассмотрен известный способ моделирования систем математическим аппаратом сетей Петри, который получил широкое применение в самых разных предметных областях. Построена сеть Петри для проектируемого программного комплекса, содержащая 48 вершин.

Проведен анализ построенной сети Петри. Он дает представление о поведении проектируемого программного комплекса. Также качественный анализ сети способствует внесению изменений в архитектуру программного комплекса на этапе проектирования.

Анализ сети производился в программной среде CPNTools версии 4.0.1. Данная среда обладает автоматизированными средствами анализа и генерирует отчеты о тупиковых состояниях системы, мертвых переходах. Анализ, проводимый в этой среде, по своей сути решает одну их основных задач теории сетей Петри – задачу достижимости.

Результатом анализа являются оценка достижимых маркировок и выявление мертвых и тупиковых состояний, приводящих к прекращению работы системы, зацикливанию и выявлению сценариев, не участвующих в работе системы. Одним из ключевых результатов анализа стало дерево достижимости. Как показал анализ, в спроектированной сети отсутствуют мертвые переходы, что сигнализирует о корректно спроектированной архитектуре программного продукта.

Ключевые слова: моделирование, сеть Петри, анализ данных, классификация, кластерный анализ, нейронная сеть, редукция данных, факторный анализ, разработка ПО

---

* *Статья получена 06 августа 2018 г.*

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании алгоритмов и создании программных систем необходим их анализ с целью проверки непротиворечивости и достижения оптимальности функционирования. Часто для этой цели используется аппарат сетей Петри, которые получили широкое применение в самых разных предметных областях: моделированию аппаратом сетей Петри может быть подвергнута почти любая система, алгоритм или процесс. Это стало возможным благодаря интенсивному развитию сетей Петри различных модификаций.

Анализ проектируемого программного продукта состоит в оценке достижимых маркировок и выявлении мертвых и тупиковых состояний, приводящих к прекращению работы системы, зацикливанию и выявлению сценариев, не участвующих в работе системы, что способствует внесению изменений в процесс проектирования.

В статье показан процесс построения сети Петри проектируемого программного продукта для кластеризации и классификации данных с предварительным сокращением размерности (редуцированием) пространства признаков и ее анализ.

1. СЕТЬ ПЕТРИ

В самом общем случае сетью Петри называется совокупность множеств

$$C = \{P,\ T,\ I,\ O\},$$

где P – конечное множество, элементы которого называются позициями; T – конечное множество, элементы которого называются переходами; I – множество входных функций, $I: T \to P$; O – множество выходных функций, $O: T \to P$.

Для моделирования сети необходимо иметь маркировку сети μ. Маркировка μ определяется как n-вектор $\mu = (\mu_1,\ \mu_2, \ldots,\ \mu_n)$, где $n = |P|$ и каждое $\mu_i \in N,\ i = 1, \ldots, n$. Вектор μ определяет для каждой позиции p_i сети Петри количество меток в этой позиции [1].

Маркированная сеть Петри может быть записана в виде: $M = (C,\ \mu)$ или $M = (P,\ T,\ I,\ O,\ \mu)$.

Сеть Петри моделируется посредством запуска переходов. Переход запускается удалением меток из его входных позиций и образованием новых меток, помещаемых в его выходные позиции. Следовательно, при моделировании сети маркировка сети будет изменяться.

Переход может запускаться только в том случае, если он разрешен. Переход $t_j \in T$ в маркированной сети Петри $C = (P,\ T,\ I,\ O)$ с маркировкой μ разрешен, если для всех $p_i \in P$:

$$\mu(p_i) \geq \#(p_i,\ I(t_j)).$$

Переход запускается удалением всех разрешающих меток из его входных позиций и последующим помещением в каждую из его выходных позиций по одной метке для каждой дуги [1].

Простое представление системы сетью Петри основано на двух основополагающих понятиях: событиях и условиях. События – это действия, имеющие место в системе. Условие есть предикат либо логическое описание состояния системы. В сети Петри условия моделируются позициями, события – переходами. Возникновение события равносильно запуску соответствующего перехода [2].

Для моделирования процесса или системы аппаратом сетей Петри необходимо определить ее вершины – позиции и переходы.

2. ОПИСАНИЕ ПРОЕКТИРУЕМОГО ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА

Сеть Петри будет отображать архитектуру разработанного авторами программного комплекса [3], который реализует анализ данных путем использования различных нейронных сетей.

Для анализа данных в программном комплексе используются такие нейронные сети, как многослойный персептрон, слой и карта Кохонена, сеть векторного квантования, сеть распознавания [4].

Однако, как уже говорилось ранее, поддерживается процесс редукции данных, который реализован посредством использования факторного анализа [5, 6] и применения автокодировщика (нейронной сети, способной обучаться без учителя, при помощи метода обратного распространения ошибки) [7].

Резюмируя вышеперечисленное, можно выделить следующие задачи, которые программный комплекс должен обеспечивать:

1) выбор и загрузка файла с данными для анализа;
2) проведение редукции данных (опционально);
3) выбор типа нейронной сети и параметров обучения для нее;
4) обучение выбранной сети на загруженных данных;
5) создание тестирующей выборки из загруженных данных;
6) проведение анализа данных при помощи обученной сети с тестирующей выборкой;
7) отображение результатов анализа;
8) формирование отчетных документов в форматах MAT и XLS.

Исходя из вышеперечисленных условий были определены вершины сети Петри и связи между ними.

Графически позицию принято обозначать овалом, переход – прямоугольником. На рис. 1 представлена сеть Петри для проектируемого программного комплекса. Она содержит 48 вершин. В начальном состоянии сети лишь одна позиция сети «Выбор в главном меню программы» содержит метку.

Процесс моделирования системы аппаратом сетей Петри также включает один важный этап – анализ спроектированной сети. Важность данного этапа заключается в выявлении тупиковых состояний, мертвых переходов или зацикливании в ходе моделирования сети [8].

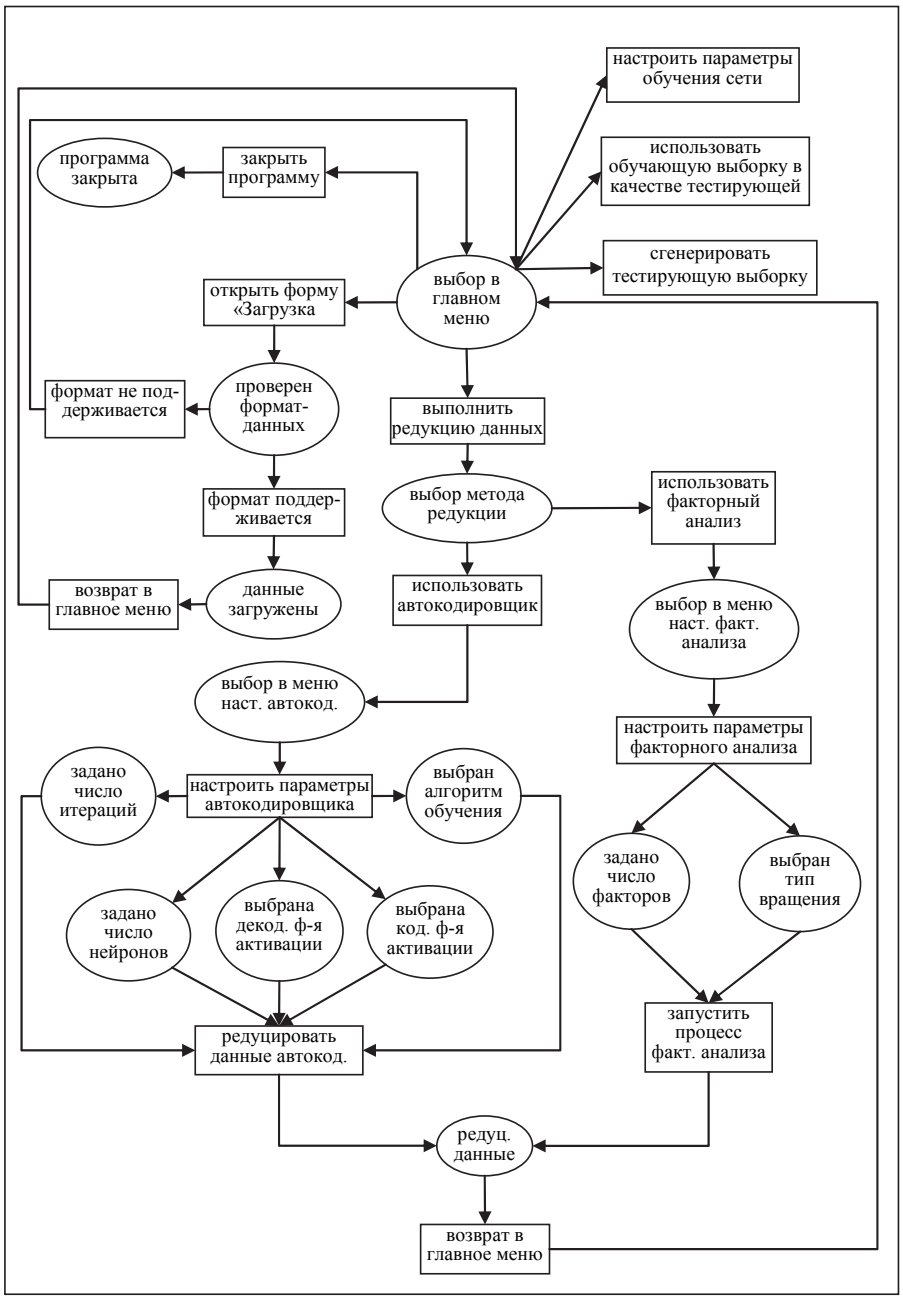

Рис. 1. Сеть Петри для проектируемого программного комплекса (часть 1)

Fig. 1. The Petri net for the designed software complex (part 1)

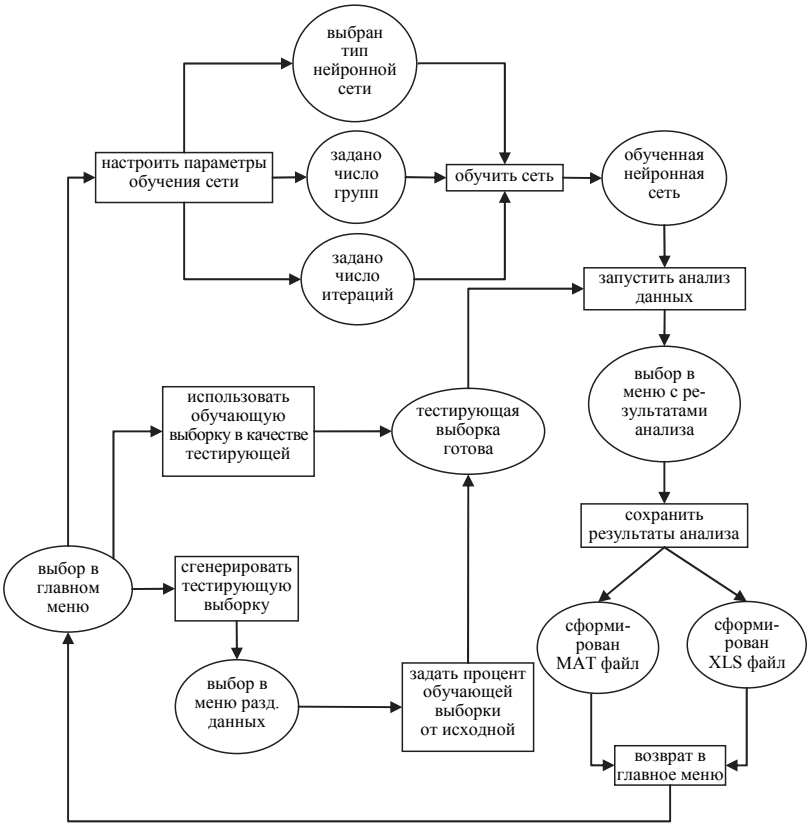

Рис. 2. Сеть Петри для проектируемого программного комплекса (часть 2)

Fig. 2. The Petri net for the designed software complex (part 2)

3. АНАЛИЗ СПРОЕКТИРОВАННОЙ СЕТИ ПЕТРИ

Анализ сети Петри дает представление о поведении проектируемого программного комплекса.

Анализ сети производился в программной среде CPNTools версии 4.0.1 [9]. Данная среда обладает автоматизированными средствами анализа и генерирует отчеты о тупиковых состояниях системы и мертвых переходах. Анализ, проводимый в этой среде, по своей сути решает одну их основных задач теории сетей Петри – задачу достижимости.

Формально задача достижимости состоит в следующем: для сети Петри с начальной маркировкой μ_0 и заданной маркировкой μ установить справедливость включения $\mu \in R(C, \mu_0)$. Иными словами, требуется выяснить, существует ли допустимая последовательность срабатываний переходов, переводящая сеть Петри из начальной маркировки в заданную [10].

В отличие от многих других программных продуктов, реализующих логику математического аппарата сетей Петри и обеспечивающих пользовательский интерфейс для работы с ними, в приведенной версии среды CPNTools поддерживается автоматизированное построение деревьев достижимости [11].

В среде CPNTools была построена сеть, идентичная приведенной на рис. 1, и проведен ее анализ. Рисунок 2 отображает полученное в результате анализа дерево достижимости.

Узлы дерева в среде CPNTools отображаются в виде рис. 3.

Рис. 3. Отображение узла дерева в среде CPN Tools

Fig. 3. A tree node in the CPN Tools software environment

На рисунке *N* – числовой номер узла дерева, *IN* – число входных дуг (ветвей), *OUT* – число выходных дуг.

Построение дерева достижимости начинается с первого (корневого) узла дерева (на рис. 4 узел дерева имеет числовой номер «1»). Можно заметить, что число узлов дерева заметно меньше вершин графа (рис. 1 и 2). Причиной этому послужили активации таких переходов, как «настроить параметры автокодировщика», «настроить параметры обучения сети», «настроить параметры факторного анализа». В результате активации приведенных переходов происходил перенос меток из входной позиции в несколько выходных позиций. Однако на дереве достижимости подобное увеличение меток в позициях отображается одним узлом.

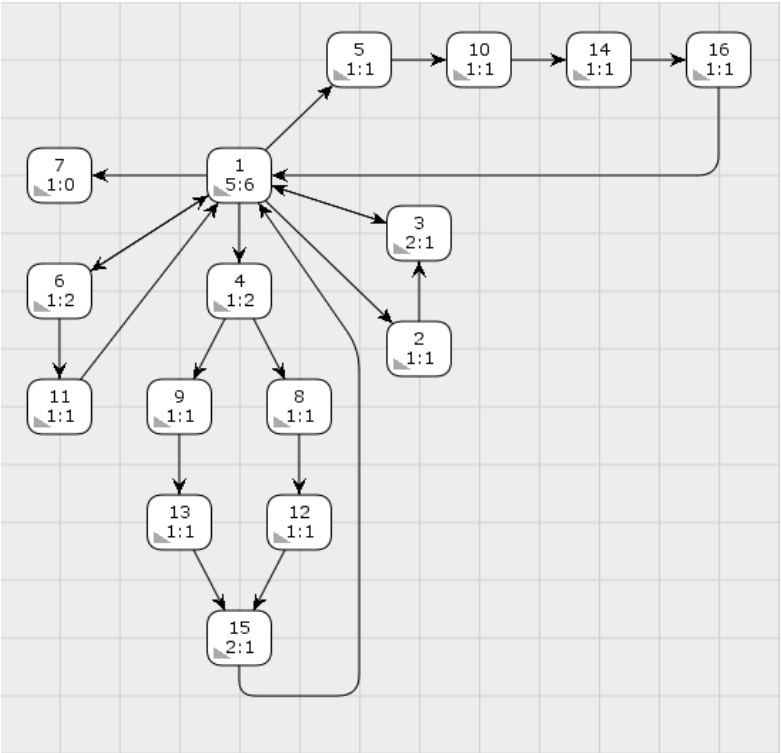

Рис. 4. Дерево достижимости сети проектируемого программного комплекса

Fig. 4. The reachability graph for the designed software complex

Как показал анализ, в спроектированной сети отсутствуют мертвые переходы, что сигнализирует о корректно спроектированной архитектуре программного продукта [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описана возможность использования математического аппарата сетей Петри на стадии проектирования программного продукта, что позволяет выявить неточности в проектировании архитектуры программных продуктов. Описанный в статье программный комплекс был реализован в среде MATLAB согласно спроектированной архитектуре [3]. После выполнения программной реализации был проведен ряд исследований по анализу данных [13–15] с использованием данного программного продукта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Котов В.Е.* Сети Петри. – М.: Наука, 1984. – 160 с.

2. *Reisig W.* Petri nets: an introduction. – Berlin; New York: Springer-Verlag, 1985. – 172 p.

3. Программный комплекс «Анализ экспериментальных данных на основе нейронных сетей»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / В.А. Харахинов, С.С. Сосинская. – № 2017618294; зарег. 04.07.2017.

4. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.

5. *Харман Г.* Современный факторный анализ. – М.: Статистика, 1972. – 484 с.

6. *Лоули Д.*, *Мансвелл А.* Факторный анализ как статистический метод. – М.: Мир, 1967. – 141 с.

7. *Hinton G.E.*, *Zemel R.S.* Autoencoders, minimum description length and Helmholtz free energy // Advances in Neural Information Processing Systems. – 1994. – Vol. 6. – P. 3–10.

8. *Марков А.В.*, *Воевода А.А.* Анализ сетей Петри при помощи деревьев достижимости // Сборник научных трудов НГТУ. – 2013. – № 1. – С. 78–95.

9. Официальный сайт разработчиков среды CPN Tools [Электронный ресурс]. – URL: http://cpntools.org/ (дата обращения: 11.12.2018).

10. *Питерсон Дж.* Теория сетей Петри и моделирование систем. – М.: Мир, 1984. – 264 с.

11. *Романников Д.О.*, *Марков А.В.* Об использовании программного пакета CPN Tools для анализа сетей Петри // Сборник научных трудов НГТУ. – 2012. – № 2. – С. 105–116.

12. *Girault C.*, *Valk R.* Petri nets for systems engineering: a guide to modeling, verification and applications. – New York: Springer, 2003. – 628 p.

13. *Харахинов В.А.*, *Сосинская С.С.* Исследование способов кластеризации деталей машиностроения на основе нейронных сетей // Программная инженерия. – 2017. – № 4. – С. 170–176.

14. *Харахинов В.А.*, *Сосинская С.С.* Влияние сокращения размерности пространства признаков на результаты классификации листьев различных видов растений // Программная инженерия. – 2018. – № 2. – С. 82–90.

15. *Харахинов В.А.* Генетический алгоритм как альтернатива обучения слоя Кохонена // Информационные технологии. – 2018. – № 10. – С. 642–648.

Харахинов Владимир Александрович, аспирант кафедры вычислительной техники Иркутского национального исследовательского технического университета. Основное направление научных исследований – искусственный интеллект, распознавание образов, параллельные вычисления. E-mail: tes4obse@mail.ru

Сосинская Софья Семеновна, кандидат технических наук, профессор кафедры вычислительной техники Иркутского национального исследовательского технического университета. Основное направление научных исследований – искусственный интеллект, распознавание образов, параллельные вычисления. Имеет более 70 печатных работ и учебных пособий. E-mail: sosinskaya@mail.ru

Kharakhinov Vladimir Alexandrovich, graduate student at the Department of Computing Engineering in INRTU The main field of his research is artificial intelligence, pattern recognition, and parallel computing. E-mail: tes4obse@mail.ru

Sosinskaya Sofya Semenovna, PhD, professor, Department of Computing Engineering, INRTU. Her research interests are currently focused on artificial intelligence, pattern recognition, and parallel computing. She has more than 70 publications and teaching manuals. E-mail: sosinskaya@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-91-100

The use of Petri nets for the software product design to analyze data using neural networks[*]

V.A. KHARAKHINOV[a], *S.S. SOSINSKAYA*[b]

Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov Street, Irkutsk, 664074, Russian Federation

[a] *tes4obse@mail.ru* [b] *sosinskaya@mail.ru*

Abstract

This paper considers the design stage of the software development process to carry out cluster analysis and classification based on artificial neural networks with a preliminary reduction of attribute space dimension also based on artificial neural networks and additionally on factor analysis. The design stage is one of the most important software development stages. Most modern software systems contain a great variety of cooperating program modules which in its turn increases the complexity of the design process. At this stage software developers use various methods. This article describes a well-known method of system modeling based on the Petri net which has been widely used in various subject areas. A Petri net with 48 vertexes was created for the developed software complex.

The realized Petri net is analyzed. The analysis provides insights into the behavior of the developed program.

The Petri net analysis was performed in the CPN Tools software environment (version 4.0.1). This environment has automated analysis tools and generates reports on deadlock states and deadlock state transitions. The analysis conducted in this environment, inherently solves one of the main problems of the Petri nets theory, namely the reachability problem.

High-quality analysis contributes to the adjustments in the software architecture at the design stage.

The analysis results are the estimation of reachable markings, identification of deadlock states that lead to a system's shutdown, looping and detection of scripts that are not participating in the system. One of the key results is the reachability graph. The analysis has shown that there are no deadlock transitions, which means that the software architecture as been designed correctly.

Keywords: modeling, Petri nets, data analysis, classification, cluster analysis, neural network, data reduction, factor analysis, software development

[*] *Received 06 August 2018.*

REFERENCES

1. Kotov V.E. *Seti Petri* [Petri nets]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 160 p.

2. Reisig W. *Petri nets: an introduction*. Berlin, New York, Springer-Verlag, 1985. 172 p.

3. Kharakhinov V.A., Sosinskaya S.S. *Programmnyi kompleks "Analiz eksperimental'nykh dannykh na osnove neironnykh setei"*. The certificate on official registration of the computer program. No. 2017618294, 2017. (In Russian, unpublished).

4. Haykin S. *Neural networks: a comprehensive foundation*. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 1999 (Russ. ed.: Khaikin S. *Neironnye seti: polnyi kurs*. 2nd ed. Moscow, Villiams Publ., 2006. 1104 p.).

5. Harman H.H. *Modern factor analysis*. 2d ed., rev. Chicago, University of Chicago Press, 1967 (Russ. ed.: Kharman G. *Sovremennyi faktornyi analiz*. Moscow, Statistika Publ., 1972. 484 p.).

6. Lawley D.N., Maxwell A.E. *Factor analysis as a statistical method*. London, Butterworths, 1963 (Russ. ed.: Louli D., Mansvell A. *Faktornyi analiz kak statisticheskii metod*. Moscow, Mir Publ., 1967. 141 p.).

7. Hinton G.E., Zemel R.S. Autoencoders, minimum description length and Helmholtz free energy. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 1994, vol. 6, pp. 3–10.

8. Markov A.V., Voevoda A.A. Analiz setei Petri pri pomoshchi derev'ev dostizhimosti [Analysis of Petri nets by trees reachable]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2013, no. 1, pp. 78–95.

9. *CPN Tools*: website. Available at: http://cpntools.org/ (accessed 11.12.2018).

10. Peterson J.L. *Petri net theory and the modeling of systems*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1981 (Russ. ed.: Piterson Dzh. *Teoriya setei Petri i modelirovanie sistem*. Moscow, Mir Publ., 1984. 264 p.).

11. Romannikov D.O., Markov A.V. Ob ispol'zovanii programmnogo paketa CPN Tools dlya analiza setei Petri [The review of works describing sharing UML diagrams and Petri nets at a design stage of software]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 2, pp. 105–116.

12. Girault C., Valk R. *Petri nets for systems engineering: a guide to modeling, verification and applications*. New York, Springer, 2003. 628 p.

13. Kharakhinov V.A., Sosinskaya S.S. Issledovanie sposobov klasterizatsii detalei mashinostroeniya na osnove neironnykh setei [The visualization methods for cluster analysis results of mechanical engineering components based on neural network]. *Programmnaya inzheneriya – Software Engineering*, 2017, no. 4, pp. 170–176.

14. Kharakhinov V.A., Sosinskaya S.S. Vliyanie sokrashcheniya razmernosti prostranstva priznakov na rezul'taty klassifikatsii list'ev razlichnykh vidov rastenii [The effect of dimension reducing on classification results of leaves of various plant species]. *Programmnaya inzheneriya – Software Engineering*, 2018, no. 2, pp. 82–90.

15. Kharakhinov V.A. Geneticheskii algoritm kak al'ternativa obucheniya sloya Kokhonena [The genetic algorithm as the alternative method for training Kohonen layer]. *Informatsionnye tekhnologii – Information Technologies*, 2018, no. 10, pp. 642–648.

Для цитирования:

Харахинов В.А., Сосинская С.С. Использование сетей Петри при проектировании архитектуры программного продукта для анализа данных с помощью нейронных сетей // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 4 (73). – С. 91–100. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-4-91-100.

For citation:

Kharakhinov V.A., Sosinskaya S.S. Ispol'zovanie setei Petri pri proektirovanii arkhitektury programmnogo produkta dlya analiza dannykh s pomoshch'yu neironnykh setei [The use of Petri nets for the software product design to analyze data using neural networks]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 4 (73), pp. 91–100. doi: 10.17212/1814-1196-2018-4-91-100.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 73, № 4, 2018, с. 101–114

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 73, No. 4, 2018, pp. 101–114

ЭНЕРГЕТИКА POWER ENGINEERING

УДК 621.311 DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-101-114

Моделирование режимов работы систем электроснабжения с установками распределенной генерации и мощной асинхронной нагрузкой*

Ю.Н. БУЛАТОВ[1,a], А.В. КРЮКОВ[2,3,b], НГУЕН ВАН ХУАН[3,c]

[1] *665709, РФ, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Братский государственный университет*
[2] *664074, РФ, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Иркутский государственный университет путей сообщения*
[3] *664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет*

[a] *bulatovyura@yandex.ru* [b] *and_kryukov@mail.ru* [c] *huanco.k7a@gmail.com*

В современной энергетике широко используются установки распределенной генерации (РГ), находящиеся в непосредственной близости к потребителю. Эти установки могут работать в изолированном (островном) режиме на выделенную нагрузку и параллельно с электроэнергетической системой (ЭЭС). Для надежного функционирования установок РГ требуется решить ряд технологических задач, в число которых входит задача оптимального управления установками РГ при переходе в островной режим и подключении резервных дизель-генера-торных установок (ДГУ). Эта задача может быть решена с использованием современных интеллектуальных технологий управления. В статье приводится описание модели системы электроснабжения (СЭС) с мощной асинхронной нагрузкой, а также турбогенераторной установкой (ТГУ) и ДГУ. Представлены результаты моделирования процессов перехода в островной режим с подключением резервных ДГУ при исчезновении связи с питающей ЭЭС. Моделирование выполнялось в среде MATLAB с использованием пакетов Simulink и SimPowerSystems.

На основе результатов моделирования сформулированы следующие выводы: при переходе в островной режим могут возникать провалы напряжения и снижение частоты. При подключении и синхронизации ДГУ напряжение и частота стабилизируются. Применение прогностических алгоритмов в регуляторах турбогенератора позволяет значительно снизить инерционность объекта, уменьшить перерегулирование и колебательность напряжения и частоты при отключении питающей ЭЭС. При подключении высоковольтных двигателей к ТГУ, работающей в островном режиме, использование автопрогностического регулятора частоты позволяет существенно улучшить демпферные свойства и снизить инерционность объекта, при этом пуск электродвигателей производится более плавно.

Ключевые слова: системы электроснабжения, установки распределенной генерации, асинхронная нагрузка, прогностический регулятор, автоматический регулятор возбуждения, автоматический регулятор частоты вращения.

---

* *Статья получена 27 июля 2018 г.*

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время наблюдается широкое использование установок распределённой генерации (РГ), находящихся в непосредственной близости от потребителей [1–6]. Установки РГ позволяют разгрузить основную сеть, повысить надежность электроснабжения и улучшить качество электроэнергии [7–11]. Особую актуальность задача внедрения современных установок РГ приобретает при модернизации систем электроснабжения (СЭС), удаленных от сетевой инфраструктуры.

Достаточно широкое распространение в действующих СЭС получили турбо и дизель-генераторные установки различной мощности. Они могут работать в островном режиме на выделенную нагрузку и параллельно с электроэнергетической системой (ЭЭС). При эксплуатации установок РГ в островном режиме необходимо учитывать ограничения по максимальному значению нагрузки, обусловленные располагаемыми мощностями РГ, а также существенное влияние на эти установки наброса или сброса активной мощности.

Параллельная работа РГ и ЭЭС позволяет стабилизировать напряжения и частоту при изменениях нагрузки. Однако параллельная работа установок РГ с промышленной сетью приводит и к негативным последствиям, заключающимся в увеличении токов короткого замыкания, усложнении релейной защиты и автоматики и т. д. Для надежного функционирования установок РГ в СЭС требуется решить ряд технологических задач, в число которых входит задача оптимального управления установками РГ при переходе в островной режим и подключении резервных дизель-генераторных установок (ДГУ). Эта задача может быть решена с использованием современных интеллектуальных технологий управления [12–21].

В статье приводится описание модели СЭС с мощной асинхронной нагрузкой и установками РГ на основе турбогенераторной установки (ТГУ) и ДГУ, а также представлены результаты моделирования процессов перехода ТГУ в островной режим при отключении связей с питающей ЭЭС и вводе в работу ДГУ. Моделирование осуществляюсь с учетом наличия у ТГУ согласованно настроенных автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ) [5, 15, 16], использующих прогностические алгоритмы управления [22–25].

1. ОПИСАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ СЭС С УСТАНОВКАМИ РГ

Моделирование выполнялось применительно к системе электроснабжения крупного промышленного предприятия, структурная схема которой представлена на рис. 1.

В состав СЭС входят два трансформатора 110/10 кВ, обеспечивающих питание секций шин 10 кВ главной понизительной подстанции. Основными потребителями электроэнергии являются асинхронные электродвигатели (АЭД) напряжением 10 кВ и 0,4 кВ. Электрическая сеть предприятия характеризуется большой разветвленностью, и питание групп низковольтных АЭД осуществляется по воздушным и кабельным линиям 10 кВ с понижением напряжения до 0,4 кВ с помощью трансформаторов. На предприятии имеются ТГУ и ДГУ с мощностями, указанными на рис. 1. При разработке модели

СЭС была учтена эквивалентная статическая активно-индуктивная нагрузка на напряжениях 10 кВ и 0,4 кВ ($\dot{S}_1$, $\dot{S}_2$).

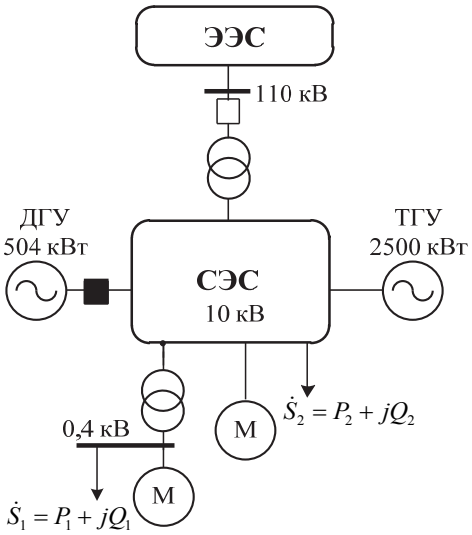

Рис. 1. Схема исследуемой СЭС

Fig. 1. A diagram of the investigated PSS

Модель исследуемой СЭС выполнялась в среде MATLAB с использованием пакетов имитационного моделирования Simulink и SimPowerSystems. Паровая турбина ТГУ моделировалась передаточной функцией

$$\frac{1}{0,2s+1}.$$

Для генератора ТГУ использовалась модель синхронной машины с демпферной обмоткой, входящая в состав пакета SimPowerSystems. Система возбуждения моделировалась апериодическим звеном первого порядка с коэффициентом k_f, постоянной времени T_f и блоком ограничения напряжения. Кроме того, в модели учитывался усилитель с коэффициентом k_a и постоянной времени T_a. Принимались следующие числовые значения параметров: $k_a = 1$; $T_a = 0,001$; $k_f = 1$; $T_f = 0,025$.

Для стабилизации напряжения на выводах генератора ТГУ и демпфирования колебаний ротора, а также для регулирования частоты применялись системы автоматического регулирования возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ). При моделировании использовались два вида АРЧВ: классический, представляющий собой пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор, а также автопрогностический, подробное описание которого представлено в работе [25]. Структурные схемы и описание моделей АРВ и АРЧВ приведено в работах [5, 15]. Настройка АРВ и АРЧВ выбиралась исходя из взаимного влияния регуляторов [15, 16].

При моделировании ДГУ учитывались следующие элементы: двигатель внутреннего сгорания, регуляторы, система возбуждения и синхронный гене-

ратор. Механическая мощность дизельного двигателя может быть определена по формуле

$$P_{mec} = \omega T_e ,$$

где ω – угловая частота вращения ротора, о.е.; T_e – крутящий момент двигателя, о.е.

Структурная схема модели дизельного двигателя с регулятором скорости, построенной с использованием блоков Simulink, представлена на рис. 2.

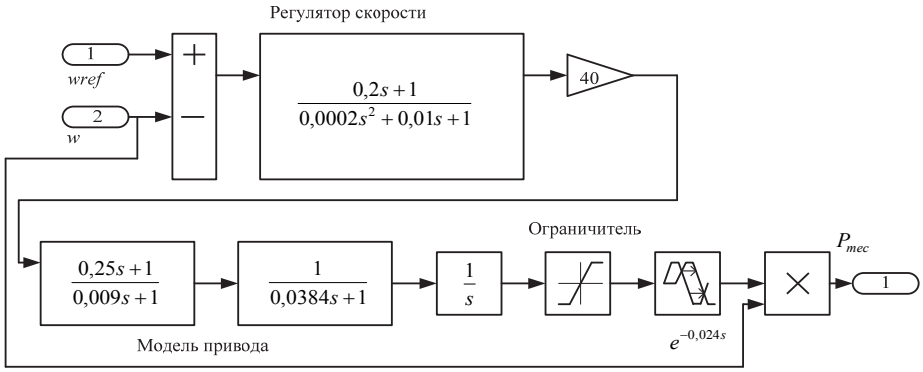

Рис. 2. Схема модели дизельного двигателя с регулятором скорости:

wref – заданное значение скорости вращения ротора, о.е.; *w* – текущее значение скорости вращения ротора, о.е.

Fig. 2. A *d*iagram of a diesel engine model with speed control:

wref is a set point value of the rotor speed, o.e .; *w* is the current value of the rotor speed, o.e.

Регулятор скорости действует на сигнал ее отклонения и предназначен для поддержания заданного режима дизельного двигателя. Блок управления скоростью моделировался с помощью передаточной функции опережения-запаздывания или ПИД-регулятора [26]. Система управления с помощью актуаторного привода регулировала подачу топлива в цилиндры двигателя. Модель привода, реализующая задержку при изменении подачи топлива, а также снижение или увеличение вращающего момента в зависимости от знака изменения количества подаваемого в цилиндры топлива, представлялась следующими передаточными функциями [26]:

$$W_{\text{п}} = \frac{0,25s+1}{0,009s+1}\,\frac{1}{0,0384s+1}\,\frac{1}{s}.$$

Двигатель моделировался звеном с запаздыванием $e^{-0,024s}$ (рис. 2). Механическая мощность двигателя ограничивалась от 0 до 1,1 о.е. с помощью блока «Ограничитель». В качестве системы возбуждения ДГУ в модели использовался стандартный блок MATLAB для системы возбуждения с регулятором в виде возбудителя постоянного тока без функции насыщения [27]. Синхронные генераторы ДГУ представлены в модели стандартными блоками

синхронной машины с демпферной обмоткой. Для моделирования асинхронных двигателей, трансформаторов и линий электропередачи использовались блоки пакета SimPowerSystems.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЭС С УСТАНОВКАМИ РГ И МОЩНОЙ АСИНХРОННОЙ НАГРУЗКОЙ

При моделировании рассматривались следующие режимы работы СЭС:

– отключение связей с питающей ЭЭС при включенной ТГУ;

– островной режим работы ТГУ с подключением дополнительной нагрузки, запуском двух высоковольтных двигателей и генератора ДГУ.

Питание всех нагрузок СЭС осуществлялось от промышленной сети и работающей ТГУ. В исходном режиме загрузка генератора ТГУ составляла 75 % (рис. 3, *а*). Коэффициенты каналов стабилизации АРВ и АРЧВ турбогенератора определялись методом согласованной настройки [5, 15]. Результаты моделирования работы ТГУ с классическим и автопрогностическим АРЧВ при отключении питания промышленной сети на стороне 110 кВ представлены на рис. 3 в виде осциллограмм механической мощности на валу турбины и отклонения скорости вращения ротора турбогенератора.

Результаты моделирования при отключении питающей ЭЭС от СЭС позволили сделать вывод о том, что использование автопрогностического АРЧВ улучшает демпферные свойства регулятора ТГУ и снижает инерционность объекта (рис. 3). Это способствует более быстрому и плавному управлению мощностью турбины по сравнению с использованием классического АРЧВ.

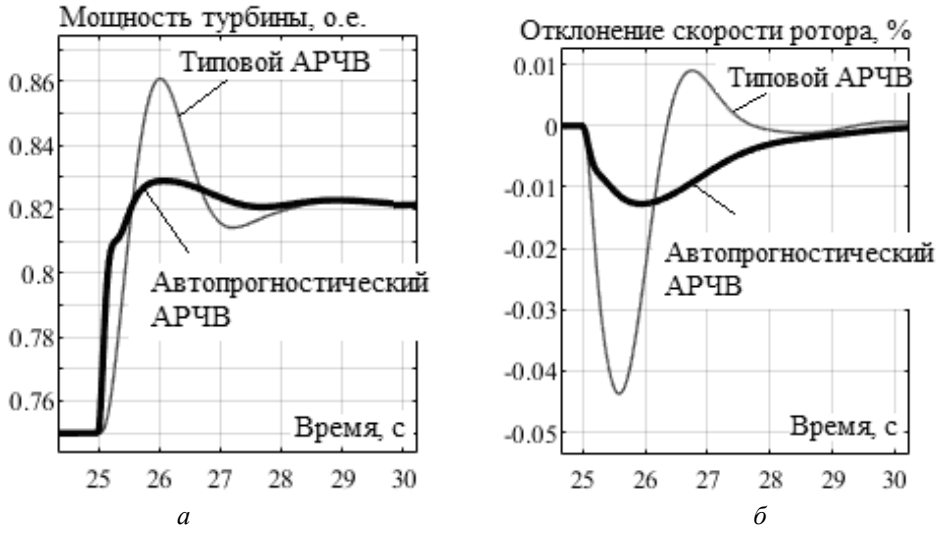

Рис. 3. Изменение мощности турбины ТГУ (*а*) и отклонение скорости вращения ротора (*б*)

Fig. 3. The change in the TGS turbine power (*a*) and the deviation of the rotation speed of the rotor (*b*)

При работе ТГУ в островном режиме моделировалось подключение дополнительной нагрузки, что приводило к перегрузке турбогенератора и снижению частоты (рис. 4, *а*). Для выравнивания частоты через 0,5 с запускалась ДГУ, и методом самосинхронизации ее генератор подключался на параллельную работу с турбогенератором. При моделировании загрузка генератора ДГУ в установившемся режиме составила 47 %. Результаты моделирования данного процесса представлены на рис. 4 и 5 в виде осциллограмм отклонения частоты вращения ротора и напряжения генератора ТГУ.

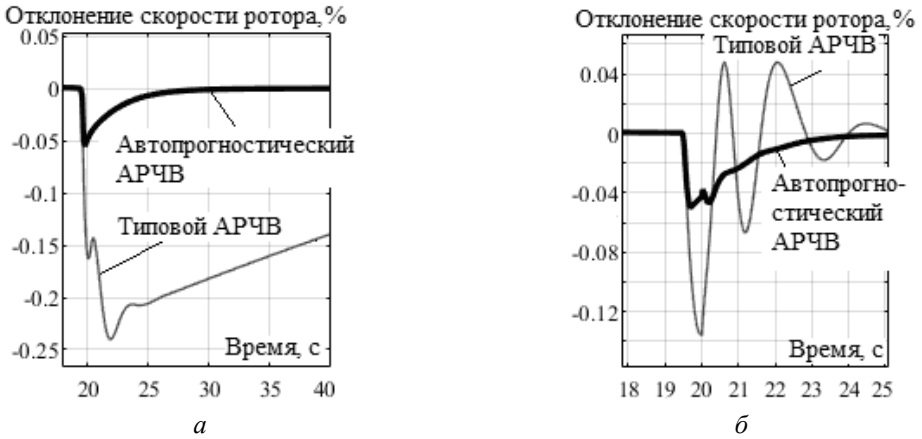

Рис. 4. Изменение частоты вращения ротора генератора ТГУ при подключении дополнительной нагрузки:

а – без запуска ДГУ; *б* – с запуском ДГУ

Fig. 4. The change in the rotor rotation frequency of the TGS generator when connecting an additional load:

a – without starting DGS; *b* – with starting DGS

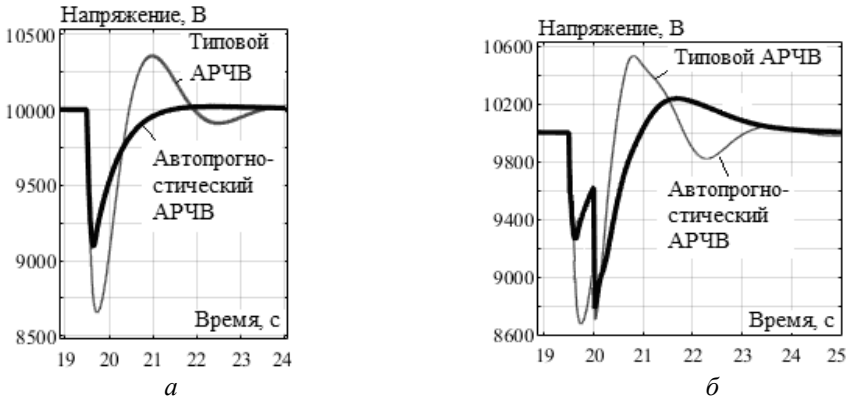

Рис. 5. Осциллограммы действующих значений фазных напряжений генератора ТГУ:

а – без запуска ДГУ; *б* – с запуском ДГУ

Fig. 5. Oscillograms of effective values of phase voltages of the TGS generator:

a – without starting DGS; *b* – with starting DGS

Результаты компьютерного моделирования показали, что при подключении дополнительной нагрузки к ТГУ, работающей в островном режиме, возникал провал напряжения и частоты в сети 10 кВ. При подключении и синхронизации ДГУ с турбогенератором стабилизировались напряжение и частота, а также параметры, характеризующие режим работы СЭС; при этом применение прогностических алгоритмов позволило значительно снизить инерционность объекта регулирования, уменьшить провалы, перерегулирование и колебательность напряжения и частоты.

В результате моделирования запуска двух высоковольтных двигателя в островном режиме выявлено, что использование автопрогностического АРЧВ позволило ускорить реакцию регулятора и уменьшить время регулирования скорости вращения ротора по сравнению с классическим АРЧВ. На рис. 6 представлены осциллограммы действующих значений напряжения и тока статора одного из двигателей при пуске, а на рис. 7 приведены управляющие сигналы АРЧВ, подтверждающие сформулированные выводы.

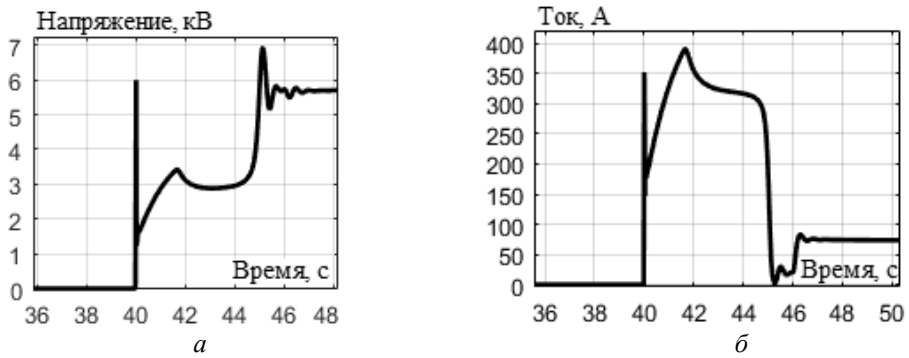

Рис. 6. Осциллограммы действующих значений напряжения (*а*) и тока статора (*б*) электродвигателя, подключаемого к ТГУ

Fig. 6. Oscillograms of effective values of voltage (*a*) and stator current (*b*) of an electric motor connected to the TGS

Рис. 7. Осциллограммы управляющего сигнала АРЧВ при подключении к ТГУ двух высоковольтных асинхронных двигателей:

1 – с использованием типового АРЧВ; *2* – с использованием автопрогностического АРЧВ

Fig. 7. Oscillograms of the ASC control signal when two high-voltage asynchronous motors are connected to the TGS:

1 is using a typical ASC; *2* is using an auto-predictive ASC

При подключении высоковольтных двигателей к ТГУ, работающей в островном режиме, использование автопрогностического АРЧВ дало воз-

можность существенно улучшить демпферные свойства регулятора и снизить инерционность объекта. Пуск высоковольтных АЭД производился более плавно.

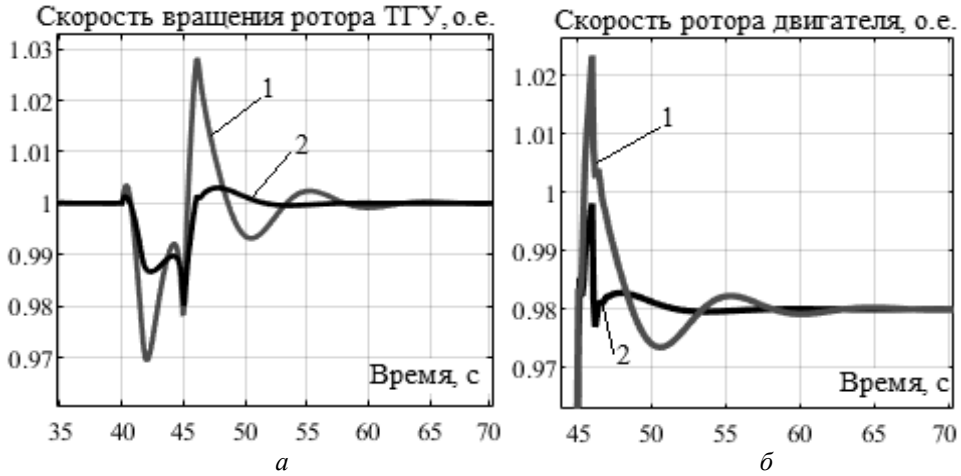

Рис. 8. Осциллограммы изменения скорости вращения ротора ТГУ (*а*) и скорости ротора двигателя (*б*) при подключении к ТГУ двух высоковольтных асинхронных двигателей:

1 – с использованием типового АРЧВ; *2* – с использованием автопрогностического АРЧВ

Fig. 8. Oscillograms of changes in the rotation speed of the of the TGS rotor (*a*) and the speed of the engine rotor (*b*) when two high-voltage asynchronous motors are connected to the TGS:

1 is using a typical ASC; *2* is using an auto-predictive ASC

Осциллограммы изменения скоростей вращения роторов ТГУ и двигателя, подтверждающие данные выводы, представлены на рис. 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты компьютерного моделирования позволяют сделать следующие выводы.

1. Использование согласованной настройки АРВ и автопрогностического АРЧВ турбогенератора улучшает демпферные свойства регуляторов, снижает инерционность объекта регулирования, делая управление частотой и напряжением более быстрым и плавным при отключении питающей ЭЭС.

2. При переводе в островной режим работы ТГУ и подключении дополнительной нагрузки возникает провал напряжения и частоты в СЭС. При включении и синхронизации ДГУ стабилизируются напряжение и частота, а также параметры, характеризующие режим работы СЭС.

3. Применение прогностических алгоритмов регулирования в АРВ и АРЧВ турбогенератора, работающего в островном режиме, позволяет значительно снизить инерционность объекта, уменьшить перерегулирование и колебательность напряжения и частоты.

4. При подключении высоковольтных двигателей к ТГУ, работающей в островном режиме, использование автопрогностического АРЧВ позволяет существенно улучшить демпферные свойства и снизить инерционность объекта. При этом пуск высоковольтных электродвигателей производится более плавно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Barker Ph.P., Mello R.W. de.* Determining the impact of distributed generation on power systems. Part 1. Radial distribution systems // 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, USA, July 11–15. – Seattle, 2000. – P. 222–233.

2. *Voropai N.I., Stychinsky Z.A.* Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics. – Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010. – 223 p.

3. *Mahmoud M.S., AL-Sunni F.M.* Control and optimization of distributed generation systems. – Cham: Springer International Publishing, 2015. – 578 p.

4. *Suslov K., Solonina N., Stepanov V.* A principle of power quality control in the intelligent distribution networks // International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies EDST 2015: proceedings. – Vienna, Austria, 2015. – P. 260–264.

5. *Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг.* Сетевые кластеры в системах электроснабжения железных дорог. – Иркутск: ИрГУПС, 2015. – 205 с.

6. *Martínez Ceseña E.A., Capuder T., Mancarella P.* Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty // IEEE Transaction on Smart Grid. – 2016. – Vol. 7. – P. 348–357.

7. *Крюков А.В., Чан З.Х.* Влияние установок распределенной генерации на качество электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 4 (36). – С. 162–167.

8. *Крюков А.В., Чан З.Х.* Анализ симметрирующего эффекта распределенной генерации // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – Иркутск: ИрГУПС, 2012. – Т. 2. – С. 75–81.

9. *Rugthaicharoencheep N., Auchariyamet S.* Technical and economic impacts of distributed generation on distribution system // International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. – 2012. – Vol. 6, N 4. – P. 385–389.

10. *Арсентьев М.О., Арсентьев О.В., Крюков А.В.* Системы электроснабжения железнодорожного транспорта с установками распределенной генерации. – Иркутск: ИрГТУ, 2013. – 152 с.

11. *Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг.* Нечеткие регуляторы для ветрогенерирующих установок // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2014. – № 7–8. – С. 60–69.

12. *Voropai N.I., Etingov P.V.* Two-stage adaptive fuzzy PSS application to power systems // Proceedings of International Conference on Electrical Engineering ICEE'2001, July 22–26. – Xi'an, China, 2001. – Vol. 1. – P. 314–318.

13. Smart grid technologies / J. Wang, A.Q. Huang, W. Sung, Y. Liu, B.J. Baliga // IEEE Industrial Electronics Magazine. – 2009. – Vol. 3, N 2. – P. 16–23.

14. PID-controller tuning optimization with genetic algorithms in servo systems / A.Y. Jaen-Cuellar, R. de J. Romero-Troncoso, L. Morales-Velazquez, R.A. Osornio-Rios // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2013. – Vol. 10. – P. 324–337.

15. *Bulatov Yu.N., Kryukov A.V.* Optimization of automatic regulator settings of the distributed generation plants on the basis of genetic algorithm // 2016 2nd International Conference on Industrial

Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2016). – Chelyabinsk, Russia, 2016. – P. 1–6.

16. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation / A.V. Kryukov, S.K. Kargapol'cev, Yu.N. Bulatov, O.N. Skrypnik, B.F. Kuznetsov // Far East Journal of Electronics and Communications. – 2017. – Vol. 17, N 5. – P. 1127–1140.

17. *Chen Y., Ma Y., Yun W.* Application of improved genetic algorithm in PID controller parameters optimization // Telkomnika. – 2013. – Vol. 11, N 3. – P. 1524–1530.

18. *Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V.* Multi-agent technologies for control of distributed generation plants in the isolated power systems // Far East Journal of Electronics and Communications. – 2017. – Vol. 17, N 5. – P. 1197–1212.

19. *Buchholz B.M., Styczynski Z.A.* Smart grids : fundamentals and technologies in electricity networks. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – 396 p.

20. *Bulatov Yu.N., Kryukov A.V.* Neuro fuzzy control system for distributed generation plants // Advances in Intelligent Systems Research. – 2018. – Vol. 158: Proceedings of the Vth International workshop "Critical infrastructures: Contingency management, Intelligent, Agent-based, Cloud computing and Cyber security" (IWCI 2018). – P. 13–19.

21. *Wang R., Wang P., Xiao G.* Intelligent microgrid management and EV control under uncertainties in smart grid. – Singapore: Springer, 2018. – 218 p.

22. *Camacho E.F., Bordons C.* Model predictive control. – 2nd ed. – London: Springer, 2007. – 405 p.

23. *Пикина Г.А.* Принцип управления по прогнозу и возможность настройки систем регулирования одним параметром // Новое в российской электроэнергетике. – 2014. – № 3. – С. 5–13.

24. *Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен В.Х.* Прогностические регуляторы для установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 1 (29). – С. 63–69. – doi: 10.18324/2077-5415-2016-1-63-69.

25. *Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен В.Х.* Автопрогностический регулятор частоты вращения ротора генератора установки распределенной генерации // Научный вестник НГТУ. – 2017. – № 1 (66). – С. 15–25.

26. SimPowerSystems: user's guide for use with Simulink / Hydro-Québec; Mathworks (Firme). – Natick, MA: MathWorks, 1998–2006.

27. IEEE Std. 421.5–1992. Recommended practice for excitation system models for power system stability studies / Energy Development and Power Generating Committee. – S. l.: IEEE, 1992.

Булатов Юрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики и электротехники Братского государственного университета. Основное направление научных исследований – моделирование и управление режимами электроэнергетических систем. Имеет более 150 публикаций. E-mail: bulatovyura@yandex.ru.

Крюков Андрей Васильевич, доктор технических наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета. Основное направление научных исследований – моделирование и управление режимами электроэнергетических систем и систем электроснабжения железных дорог. Имеет более 600 публикаций. E-mail: and_kryukov@mail.ru.

Нгуен Ван Хуан, аспирант Иркутского национального исследовательского технического университета. Основное направление научных исследований – моделирование и

управление режимами электроэнергетических систем и систем электроснабжения железных дорог. Имеет более 20 публикаций. E-mail: huanco.k7a@gmail.com

Bulatov Yuri Nikolaevich, PhD (Eng.), associate professor, head of the department of power and electrical engineering, Bratsk State University. His research interests are focused on modeling and management of power system modes. He is the author of more than 150 publications. E-mail: bulatovyura@yandex.ru.

Kryukov Andrei Vassilievich, D.Sc. (Eng.), professor at the Irkutsk State Transport University a professor at the Irkutsk National Research Technical University. The main field of his research is modeling and management of power system and railroad power supply system modes. He is the author of more than 600 publications. E-mail: and_kryukov@mail.ru

Nguen Van Khuan, postgraduate student at the Irkutsk National Research Technical University. The main field of his research is modeling and management of power system and railroad power supply system modes. He has published over 20 research papers. E-mail: huanco.k7a@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-101-114

Modeling of power supply system operating modes with distributed generation plants and a powerful asynchronous load[*]

YU.N. BULATOV[1,a], *A.V. KRYUKOV*[2,3,b], *NGUEN VAN KHUAN*[3,c]

[1] *Bratsk State University, 40, Makarenko Street, Bratsk, 665709, Russian Federation*
[2] *Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk State Transport University, 15, Chernishevskaya Street, Irkutsk, 664074, Russian Federation*
[3] *Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov Street, Irkutsk, 664074, Russian Federation*

[a] *bulatovyura@yandex.ru* [b] *and_kryukov@mail.ru* [c] *huanco.k7a@gmail.com*

Abstract

Distributed generation (DG) plants located in close proximity to consumers are widely used in modern power industry. These plants can operate in an isolated (island) mode for a dedicated load and in parallel with the electric power system (EPS). For reliable operation of the DG plants, it is necessary to solve a number of technological problems, including the problem of optimal control of the DG plants when switching to the island mode and connecting backup diesel generator plants (DiesGP). This problem can be solved using modern intelligent control technologies. The article describes a model of a power supply system (PSS) with a powerful asynchronous load as well as a turbo-generator plant (TGP) and a DiesGP. The results of modeling the transition to an island mode with the connection of backup DiesGP are presented when the communication with the supplying EPS is interrupted. The simulation was performed in the MATLAB environment using Simulink and SimPowerSystems packages.

Based on the simulation results, the following conclusions are formulated: during the transition to the island mode, voltage dips and a decrease in frequency may occur. When con-

[*] *Received 27 July 2018.*

necting and synchronizing the diesel generator plant, the voltage and frequency stabilize. The use of prognostic algorithms in the regulators of the turbo-generator can significantly reduce the inertia of the object, reduce the overshoot and fluctuations in voltage and frequency when the supply EPS is disconnected. When high-voltage motors are connected to a TGP operating in the island mode, the use of an automatic prognostic controller can significantly improve the damping properties and reduce the inertia of the object; at the same time start-up of electric motors is performed more smoothly.

Keywords: power supply system, distributed generation plants, asynchronous load, prognostic controller, automatic field controller, automatic speed controller

REFERENCES

1. Barker Ph.P., Mello R.W. de. Determining the impact of distributed generation on power systems. Part 1. Radial distribution systems. *2000 IEEE PES Summer Meeting*, Seattle, WA, USA, July 11–15, pp. 222–233.

2. Voropai N.I., Stychinsky Z.A. *Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics*. Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität, 2010. 223 p.

3. Mahmoud M.S., AL-Sunni F.M. *Control and optimization of distributed generation systems*, Cham, Springer International Publishing, 2015. 578 p.

4. Suslov K., Solonina N., Stepanov V. A principle of power quality control in the intelligent distribution networks. *International symposium on smart electric distribution systems and technologies EDST 2015*: proceedings, Vienna, Austria, 2015, pp. 260–264.

5. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Z.Kh. *Setevye klastery v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog* [Network clusters in systems of electrical power supply of the railroads]. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2015. 205 p.

6. Martínez Ceseña E.A., Capuder T., Mancarella P. Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 2016, vol. 7, pp. 348–357.

7. Kryukov A.V., Chan Z.Kh. Vliyanie ustanovok raspredelennoi generatsii na kachestvo elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Influence of installations of the distributed generation on quality of the electric power in systems of electrical power supply of the railroads]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern Technologies. System analysis. Modeling*, 2012, no. 4 (36), pp. 162–167.

8. Kryukov A.V., Chan Z.Kh. Analiz simmetriruyushchego effekta raspredelennoi generatsii [The analysis of the symmetrizing effect of the distributed generation]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. Irkutsk, 2012, vol. 2, pp. 75–81.

9. Rugthaicharoencheep N., Auchariyamet S. Technical and economic impacts of distributed generation on distribution system. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2012, vol. 6, no. 4, pp. 385–389.

10. Arsent'ev M.O., Arsent'ev O.V., Kryukov A.V. *Sistemy elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta s ustanovkami raspredelennoi generatsii* [Systems of power supply of railway transport with installations of the distributed generation]. Irkutsk, IrGTU Publ., 2013. 152 p.

11. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Nechetkie regulyatory dlya vetrogeneriruyushchikh ustanovok [Indistinct regulators for the wind generator of installations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki – Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*, 2014, no. 7–8, pp. 60–69.

12. Voropai N.I., Etingov P.V. Two-stage adaptive fuzzy PSS application to power systems. *Proceedings of International Conference on Electrical Engineering ICEE'2001*, July 22–26, Xi'an, China, 2001, vol. 1, pp. 314–318.

13. Wang J., Huang A.Q., Sung W., Liu Y., Baliga B.J. Smart grid technologies. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2009, vol. 3, no. 2, pp. 16–23.

14. Jaen-Cuellar A.Y., Romero-Troncoso R. de J., Morales-Velazquez L., Osornio-Rios R.A. PID-controller tuning optimization with genetic algorithms in servo systems. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, vol. 10, pp. 324–337.

15. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Optimization of automatic regulator settings of the distributed generation plants on the basis of genetic algorithm. *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2016)*, Chelyabinsk, Russia, 2016, pp. 1–6.

16. Kryukov A.V., Kargapol'cev S.K., Bulatov Yu.N., Skrypnik O.N., Kuznetsov B.F. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation. *Far East Journal of Electronics and Communications*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 1127–1140.

17. Chen Y., Ma Y., Yun W. Application of improved genetic algorithm in PID controller parameters optimization. *Telkomnika*, 2013, vol. 11, no. 3, pp. 1524–1530.

18. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. Multi-agent technologies for control of distributed generation plants in the isolated power systems. *Far East Journal of Electronics and Communications*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 1197–1212.

19. Buchholz B.M., Styczynski Z.A. *Smart grids: fundamentals and technologies in electricity networks*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2014. 396 p.

20. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Neuro fuzzy control system for distributed generation plants. *Advances in Intelligent Systems Research*, 2018, vol. 158, pp. 13–19.

21. Wang R., Wang P., Xiao G. *Intelligent microgrid management and EV control under uncertainties in smart grid*. Singapore, Springer, 2018. 218 p.

22. Camacho E.F., Bordons C. *Model predictive control*. 2nd ed. London, Springer, 2007. 405 p.

23. Pikina G.A. Printsip upravleniya po prognozu i vozmozhnost' nastroiki sistem regulirovaniya odnim parametrom [Principle of management according to the forecast and a possibility of control of systems of regulation by one parameter]. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike – New in the Russian Electrical Power-Engineering*, 2014, no. 3, pp. 5–13.

24. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen V.Kh. Prognosticheskie regulyatory dlya ustanovok raspredelennoi generatsii [Prognostic regulators for installations of the distributed generation]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2016, no. 1 (29), pp. 63–69. doi: 10.18324/2077-5415-2016-1-63-69.

25. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen V.Kh. Avtoprognosticheskii regulyator chastoty vrashcheniya rotora generatora ustanovki raspredelennoi generatsii [Distributed generator rotor speed automatic prognostic controller]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 1 (66), pp. 15–25.

26. *SimPowerSystems: user's guide for use with Simulink*. Hydro-Québec, Mathworks (Firme). Natick, MA, MathWorks, 1998–2006.

27. *IEEE Std. 421.5–1992. Recommended practice for excitation system models for power system stability studies*. Energy Development and Power Generating Committee. IEEE, 1992.

Для цитирования:

Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен Ван Хуан. Моделирование режимов работы систем электроснабжения с установками распределенной генерации и мощной асинхронной нагрузкой // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 4 (73). – С. 101–114. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-4-101-114.

For citation:

Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen Van Khuan. Modelirovanie rezhimov raboty sistem elektrosnabzheniya s ustanovkami raspredelennoi generatsii i moshchnoi asinkhronnoi nagruzkoi [Modeling of power supply system operating modes with distributed generation plants and a powerful asynchronous load]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 4 (73), pp. 101–114. doi: 10.17212/1814-1196-2018-4-101-114.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 73, № 4, 2018, с. 115–127

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 73, No. 4, 2018, pp. 115–127

ЭНЕРГЕТИКА POWER ENGINEERING

УДК 621.311 DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-115-127

Устойчивость оптимальных параметров теплофикационных энергоблоков при разукрупнении графиков электрических и тепловых нагрузок*

П.А. ЩИННИКОВ[a], Д.С. СИНЕЛЬНИКОВ[b]

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

[a] *tes.nstu@gmail.com* [b] *sinelnikovden@hotmail.com*

В России преимущественное распространение имеют централизованные системы теплоснабжения, при этом центральный источник теплоты в виде ТЭЦ, как правило, проектировался на максимальную тепловую нагрузку с перспективой ее дальнейшего роста. Такой подход позволял обеспечить заметную экономию топлива за счет комбинированной выработки электроэнергии и теплоты. Сегодня у теплоцентралей чаще всего нет не только перспективной тепловой нагрузки, но потеряна значительная доля производственного потребителя, что ведет к снижению их эффективности. Вместе с тем в последнее время активно развиваются так называемые распределенные (местные, локальные, децентрализованные) системы. Это связано с желанием собственников обособиться от монопольно поставляемой теплоты от ТЭЦ. Указанные системы развиваются стихийно. Централизованные и распределенные системы сосуществуют вне строгих количественных оценок их рационального сочетания. Это приводит к избытку установленных мощностей, неэффективной загрузке оборудования, выходу на нерасчетные режимы работы, расхождению балансов энергии и мощности, повышенному расходу топлива, другим проблемам. Во всех случаях в конечном итоге страдает потребитель. Теплофикационные энергоблоки электростанций и сформированные из них и распределенных источников теплоты системы являются сложными объектами. Их изучение невозможно без применения математического моделирования. Задачи оптимизации подобных систем относятся к классу наиболее сложных. Целью настоящей работы является повышение эффективности работы централизованных источников теплоты, работающих в распределенных системах при зонировании температурного графика, а также проверка устойчивости полученных решений. Разделение графика на зоны предлагается по принципу регулирования отпуска теплоты.

Ключевые слова: эксергетический метод, зонирование температурного графика, оптимизация параметров, устойчивость, комбинированное теплоснабжение, теплофикация, моделирование

* *Статья получена 08 сентября 2018 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Комбинированный способ производства электрической и тепловой энергии сохраняет свои преимущества перед раздельным, обеспечивая существенную экономию топлива. На каждом килограмме пара в секунду, который отпускается от ТЭЦ на теплоснабжение, экономится около 33 килограммов условного топлива в час по сравнению с котельной [1]. ТЭЦ, кроме термодинамических и энергетических преимуществ, обладает также надежностными преимуществами перед другими способами энергоснабжения, так как имеют все виды резервирования: структурное, нагрузочное, функциональное, временное и системное.

Вместе с тем современная энергетика развивается по пути децентрализации, когда большое количество генерирующих источников – как правило, малой мощности – устанавливают непосредственно у потребителя (или вблизи). Такие малые установки могут генерировать как электрическую, так и тепловую энергию, а их установленная мощность лежит в диапазоне от десятков киловатт до десятков мегаватт. Часто такие установки совмещают принцип когенерации, т. е. отпускают потребителю два вида продукции – теплоту и электроэнергию.

В этих условиях традиционные теплоцентрали теряют своего потребителя, а их экономичность снижается из-за снижения выработки электроэнергии на тепловом потреблении. Другими словами, ТЭЦ начинает терять свое основное преимущество – комбинированную выработку тепловой и электрической энергии. Для преодоления этих сложностей предложены комбинированные системы теплоснабжения [2], когда в общем случае имеется два источника генерирующих теплоту. Указанные источники принято называть центральным и удаленным. Роль центрального источника выполняет традиционная ТЭЦ, а в качестве удаленного источника (этот источник удален от ТЭЦ и находится в непосредственной близости от потребителя) может выступать двигатель внутреннего сгорания (ДВС), газотурбинная установка (ГТУ), внутриквартальные мини-ТЭС, котельные, тепловые насосы и другие установки. Вопросы применения подобных комбинированных систем теплоснабжения достаточно широко освещены в печати [1, 3–19].

1. ПРИНЦИПЫ ЗОНИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАФИКА

Предлагается обеспечить зонирование теплового графика с одновременным отказом от традиционного регулирования отпуска теплоты от центрального источника (ТЭЦ). В этом случае стандартный температурный график 150/70 °С имеет три ярко выраженные зоны (периоды), которые характеризуют разные способы регулирования (рис. 1).

Период I отвечает за режим горячего теплоснабжения (ГВС) и начало отопительного сезона и характеризуется количественным способом регулирования. При этом способе увеличение количества отпускаемой тепловой энергии обеспечивается увеличением расхода при неизменной температуре прямой сетевой воды ($t_{\text{пс}}$). Период III начинается в точке максимальной теплофикационной нагрузки (точка *M*, рис. 1), обеспечивает отопительную нагрузку и характеризуется качественным регулированием, при котором уве-

личение количества отпускаемой теплоты обеспечивается увеличением температуры за счет увеличения давления в регулируемом отборе турбины. Одновременно с началом периода III вступает в работу пиковый водогрейный котел (ПВК) в стандартных схемах теплоснабжения ТЭЦ–ПВК–МТ–П (здесь МТ – магистральная теплосеть; П – потребитель теплоты). Коэффициент теплофикации становится меньше единицы $(\alpha_{ТЭЦ} < 1)$.

Период II является переходным от количественного регулирования к качественному, но одновременно этот период характеризует работу ТЭЦ (центрального источника) в наиболее эффективном режиме, так как отопительная нагрузка уже подключена, а коэффициент теплофикации равен единице $(\alpha_{ТЭЦ} = 1)$. В этом смысле зону II графика (рис. 1) можно считать базовой. Для регулирования отпуска теплоты в этой зоне предлагается применять качественно-количественный способ, когда задействованы и расход сетевой воды, и температура отборного пара.

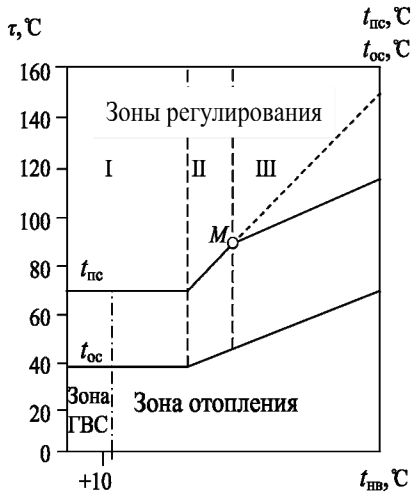

Рис. 1. Зонированный отопительно-бытовой температурный график 150/70 ºС:

$t_{пс}$, $t_{ос}$, $t_{нв}$ – температура прямой, обратной сетевой воды и наружного воздуха соответственно

Fig. 1. The zoned heating and household temperature chart 150/70 ºС:

t_{ps}, t_{oc}, t_{vv} are direct, reverse network and outdoor air temperatures, respectively

Годовая теплофикационная нагрузка $Q_{ТЭЦ}$, полученная как интегральная характеристика с учетом времени τ стояния температуры $t_{вз}$, для условий зонирования температурного графика имеет три характерные зоны. Первая зона обусловлена количественным регулированием отпуска теплоты, вторая зона – качественно-количественным (смешанным) регулированием, третья – качественным.

Представляя комбинированную систему отпуска теплоты как единую технологическую цепь, содержащую центральный источник теплоты (ТЭЦ), магистральный теплопровод (МТ), удаленный источник теплоты (например, в виде газопоршневой установки (ГПУ) с когенерацией) и потребителя, можно записать расход топлива в такой системе, кг/с:

$$B_{\Sigma} = B_{ТЭЦ} + B_{ГПУ}; \qquad (1)$$

где $B_{ТЭЦ}$, $B_{ГПУ}$ – расход топлива теплоцентралью и газопоршневой установкой соответственно.

Задача наивыгоднейшего сочетания всех ее элементов (ТЭЦ–МТ–ГПУ–П), включая параметры термодинамических циклов задействованных энергети-

ческих установок, может быть представлена как минимизация суммарного расхода топлива:

$$B_{\Sigma} \to \min. \tag{2}$$

Этот показатель может являться критерием оптимизации параметров $(p_0, t_0, t_{пп}, t_{пв}, p_к, \alpha_{ТЭЦ})$ энергоблоков ТЭЦ, работающих в комбинированной системе теплоснабжения при использовании известного подхода.

2. ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭНЕРГОБЛОКОВ В УСЛОВИЯХ ЗОНИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАФИКА

Задачу оптимизации параметров энергоблоков ТЭЦ в условиях разукрупнения и зонирования температурного графика тепловых нагрузок можно сформулировать следующим образом: минимизация расхода топлива в системе теплоснабжения.

Нахождение решения для целевой функции, удовлетворяющее критерию поиска, обеспечивает наилучшие сочетания оптимизируемых параметров. Факторы внутренних связей и внешней среды обусловливают ограничения моделирования, которые выражаются в виде равенств и неравенств и отражают, с одной стороны, техническую достижимость, с другой – устойчивость оптимальных решений в изменяющихся условиях.

Ограничениями выступают технически достигаемые значения параметров в условиях реальной эксплуатации энергоблоков, с одной стороны, и ограничения на применяемые математические методы – с другой. На рис. 2 приведены оптимизированные параметры острого пара и промперегрева Т- и ПТ-энергоблоков ТЭЦ при зонировании температурного графика. Из рис. 1 видно, что при разработке специальных (оптимальных) энергоблоков для работы в составе ТЭЦ с зонированием температурного графика давление острого пара (начальное давление) для Т- и ПТ-энергоблоков без промперегрева должно приниматься на уровне 12 МПа, а с промперегревом – 24 Мпа, начальная температура (острого пара) на уровне 510 °С. Такие параметры обусловлены в первую очередь снижением давления в Т-отборе в течение всего отопительного периода. При этом пониженное по сравнению со стандартным давление (12 МПа) в сочетании с меньшим давлением в Т-отборе обеспечивало приемлемый теплоперепад на турбину при одновременном увеличении пропуска пара в ЦНД, что в итоге практически не изменяет отпуска электроэнергии и повышает коэффициент готовности энергоблоков. Вместе с тем при увеличении мощности энергоблоков без промперегрева за счет повышения начальной температуры пара по сравнению со стандартными значениями растет теплоперепад, что уменьшает расход пара на турбину, паропроизводительность котла и снижает расход топлива на котел при прочих равных условиях.

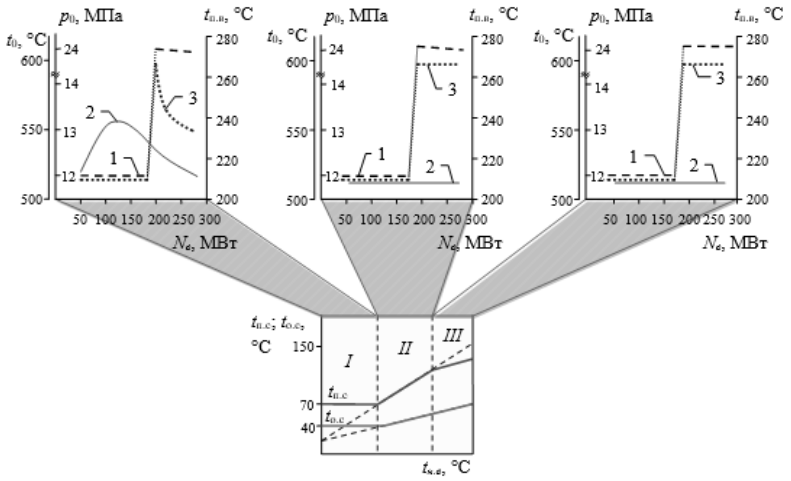

Рис. 2. Оптимальные параметры (p_0, t_0, $t_{п.в}$) теплофикационных энергоблоков в разных зонах температурного графика:

p_0 – давление острого пара (линия *1*); t – температура острого пара (линия *2*); $t_{п.в}$ – температура питательной воды (линия *3*); I , II, III – зоны количественного, смешанного и качественного регулирования; N_e – единичная электрическая мощность теплофикационных энергоблоков; $t_{п.с}$ – температура прямой сетевой воды; $t_{о.с}$ – температура обратной сетевой воды; $t_{н.в}$ – температура наружного воздуха

Fig. 2. Optimal parameters (p_0, t_0, $t_{s.w.}$) of cogeneration power units in different zones of the temperature graph:

p_0 is direct steam pressure (line *1*); t is the temperature of the live steam (line *2*); $t_{s.w.}$ is the feed water temperature (line *3*); I, II, III are zones of quantitative, mixed and qualitative regulation; Ne is the unit electrical power of the cogeneration power units; $t_{d.n.}$is the temperature of direct network water; $t_{r.n.}$ is the return network water temperature; $t_{o.a.}$ is the outdoor temperature

Оптимальные энергоблоки с промперегревом имеют стандартное начальное давление пара на уровне 24 МПа при начальных температурах пара 510 °С. Такая температура пара обеспечивает приемлемые коэффициенты готовности энергоблоков, увеличение теплоперепадов по сравнению с традиционным способом расчета при уменьшении расходов пара на турбину. Вместе с тем параметры блоков с промперегревом обусловлены также более высоким по сравнению с традиционными блоками давлением и более низкой температурой промперегрева пара (рис. 2), при этом блоки без промперегрева имеют более низкие параметры давления и температуры по сравнению с традиционным методом расчета, что ведет к уменьшению затратной составляющей в виде капиталовложений при проектировании блока при сохранении номинальных энергетических характеристик и качества отпускаемой продукции. В итоге оптимальные энергоблоки в составе ТЭЦ с зонированием температурного графика имеют более высокую эксергетическую эффективность. Отметим, что ПТ-энергоблоки в составе ТЭЦ с зонированием температурного графика эксергетически более эффективны, чем Т-энергоблоки без промперегрева. Это обусловлено более высокой теплоэксергетической производительностью ПТ-энергоблоков по сравнению с Т-энергоблоками за счет П-отбора и меньшим влиянием режима с пониженным давлением Т-отбора.

Важным параметром, определяющим схему регенерации, является температура питательной воды. Оптимальная температура питательной воды (рис. 3) для оптимального энергоблока с промперегревом принимается на уровне 270 °С, что выше традиционной $t_{пв}$ на 30…50 °С. Для обеспечения такой температуры питательной воды требуется установка четырех ПВД вместо трех, а паровая турбина должна иметь еще один отбор высокого давления.

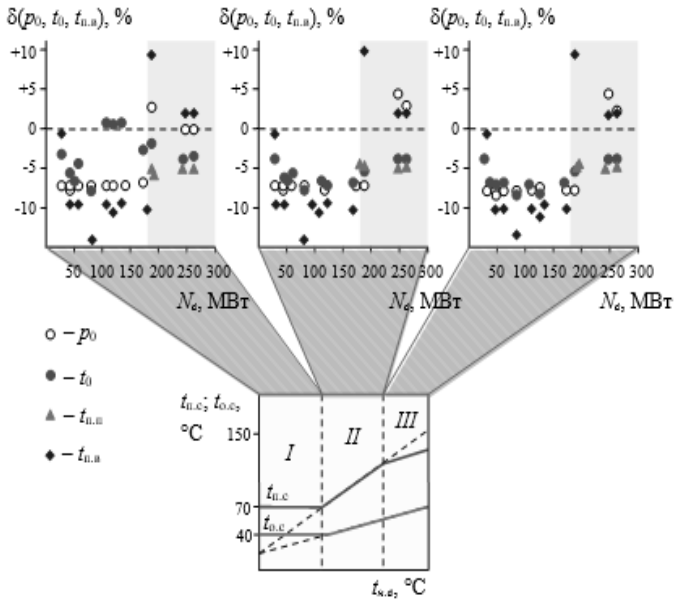

Рис. 3. Отклонения δ параметров p_0, t_0, $t_{п.в}$ от номинального значения при оптимизации в условиях зонирования температурного графика в зависимости от единичной мощности теплофикационных энергоблоков (N_e – единичная электрическая мощность теплофикационных энергоблоков)

Fig. 3. Deviations δ of the parameters p_0, t_0, $t_{s.w.}$ from the nominal value during optimization in the conditions of zoning of the temperature graph depending on the unit capacity of the cogeneration units (N_e is the unit electrical power of the heat generating units)

Важно отметить, что для блоков без промперегрева оптимальная температура питательной воды (рис. 3) ниже стандартных значений на 15…30 °С. Так, для этих энергоблоков целесообразно принимать схему регенеративного подогрева без ПВД или с одним ПВД. При этом уменьшается количество острого пара на турбину на 5…15 % и соответственно снижается производительность котлов. Для этих турбин t_0 на 30…40 °С ниже стандартного значения. В итоге коэффициент готовности выше, чем при стандартных параметрах, что уменьшает коэффициент резерва в энергосистеме при вводе ТЭЦ с зонированием температурного графика с такими турбинами на 6…14 % по сравнению с традиционными ТЭЦ. Понятно, что при таких параметрах эксер-

гетический КПД парогенерирующей части будет меньше, чем при стандартных параметрах. Однако уменьшатся и капиталовложения в котел в среднем на 10 %, а общий эксергетический КПД блока будет расти.

3. УСТОЙЧИВОСТЬ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ЗОНЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАФИКА

Оценка устойчивости оптимальных параметров энергоблоков с технологией ТЭЦ с зонированием температурного графика проведена по внешним (по отношению к исследуемому энергоблоку) параметрам и показателям в условиях разуплотнения графиков нагрузок для первой зоны температурного графика путем изменения электрической нагрузки. В качестве объектов исследования определены энергоблоки на базе турбин Т-50, Т-110, Т-120, Т-175, Т-180, Т-250, Т-265, ПТ-30, ПТ-50, ПТ-65, ПТ-80 и ПТ-135.

Исходные данные для расчета показателей устойчивости приведены в табл. 1, нагрузка горячего водоснабжения составляет 15 % от номинальной нагрузки, производственные отборы пара нагружены полностью.

Исходные данные для расчета устойчивости

Baseline for calculating stability

Турбины	I серия $N = 0{,}85N_{ном}$		II серия $N = 0{,}7N_{ном}$		III серия $N = 0{,}55N_{ном}$	
	Q, МВт	N, МВт	Q, МВт	N, МВт	Q, МВт	N, МВт
Т-50	42,5	50	35	50	27,5	50
Т-110	93,5	110	77	110	60,5	110
Т-120	102	120	84	120	66	120
Т-175	148,75	175	122,5	175	96,25	175
Т-180	153	180	126	180	99	180
Т-250	212,5	250	175	250	137,5	250
Т-265	225,25	265	185,5	265	145,75	265
ПТ-30	25,5	30	21	30	16,5	30
ПТ-50	42,5	50	35	50	27,5	50
ПТ-65	55,25	65	45,5	65	35,75	65
ПТ-80	68	80	56	80	44	80
ПТ 135	114,75	135	94,5	135	74,25	135

На рис. 4 показано изменение оптимальных параметров энергоблоков с технологией ТЭЦ с зонированием температурного графика (p_0, t_0, $t_{пв}$, $\alpha_{ТЭЦ}$) в зависимости от электрической нагрузки. При этом оптимальные

давления p_0 для практически всех рассмотренных турбин устойчивы во всем диапазоне мощности турбин и принимают значения для энергоблоков без промперегрева около 12 МПа, для энергоблоков с промперегревом – на уровне стандартных. Изменений коэффициента теплофикации для $\alpha_{ТЭЦ}$ ПТ энергоблоков не наблюдается (рис. 4).

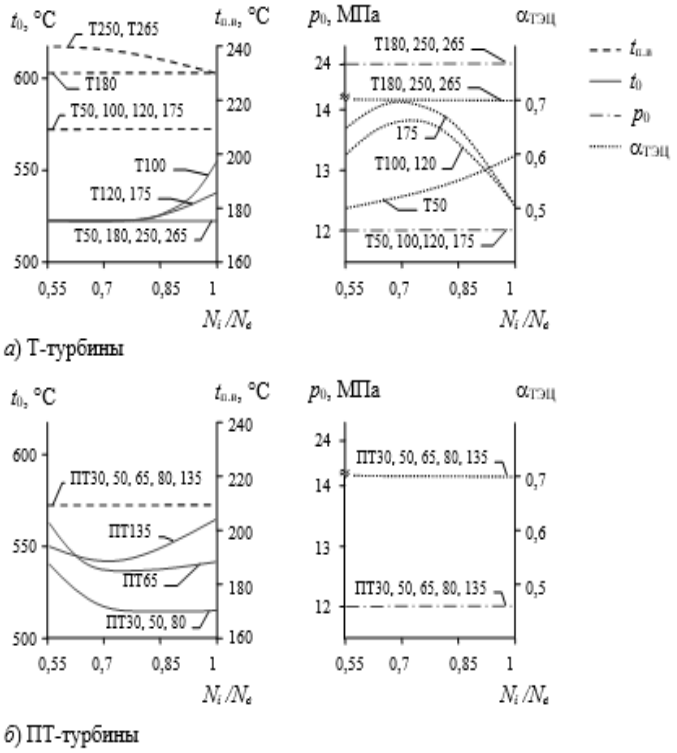

Рис. 4. Изменение оптимальных параметров теплофикационных энергоблоков в зависимости от электрической нагрузки (разукрупнение электрического графика нагрузки) для зоны 1 температурного графика

Fig. 4. Changes in the optimal parameters of cogeneration units depending on the electrical load (disaggregation of the electrical load graph) for zone 1 of the temperature graph

Температура острого пара t_0 для отдельных типов Т-энергоблоков имеет незначительные отклонения, не превышающие 15 °С, однако стоит отметить что для турбины Т-180 на номинальной нагрузке отклонение составляет 25 °С. Температура острого пара для энергоблоков ПТ-30, ПТ-50, ПТ-80 с увеличением мощности снижается относительно стандартных параметров на 40 °С, для ПТ-65 – на 25 °С. Интересно отметить поведение энергоблока ПТ-135: при увеличении нагрузки можно видеть незначительное снижение температуры острого пара на 5 °С, затем имеет место рост на 15 °С.

Удельные расходы топлива *b*, как видно из рис. 5, для ПТ-энергоблоков изменяются мало при переходе на технологию ТЭЦ с зонированием температурного графика. Более того, перевод ПТ-энергоблоков стандартных параметров на пониженное давление острого пара приводит даже к некоторому увеличению *b*. Это вызвано снижением удельного расхода топлива на отпускаемое теплофикационное тепло. Вместе с тем для Т-энергоблоков оптимизация в зоне количественного регулирования дает ощутимый эффект. Понятно, что удельный расход условного топлива тем меньше, чем выше относительная мощность энергоблока: для Т-50 удельный расход условного топлива составляет 0,05 кг у.т/кВт · ч эксергии; для Т-100, Т-120 и Т-175 – 0,1 кг у.т/кВт · ч; для Т-180, Т-250 и Т-265 – 0,01 кг у.т/кВт · ч при увеличении относительной мощности энергоблока с 0,55 до 1.

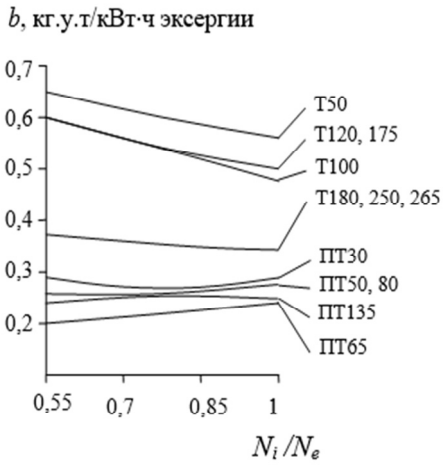

Рис. 5. Удельный расход условного топлива (*b*) на произведенную энергоблоком эксергию при разукрупнении графика электрической нагрузки в зоне I температурного графика (количественное регулирование)

Fig. 5. Specific consumption of reference fuel (*b*) for the exergy produced by the power units when the electrical load diagram is disaggregated in the zone I of the temperature graph (quantitative regulation)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены оптимальные параметры теплофикационных энергоблоков в различных зонах температурного графика.

2. Показано, что при зонировании температурного графика для зоны смешанного и качественного регулирования оптимальные параметры энергоблоков соответствуют стандартным значениям на уровне 12 МПа, 510 °С для блоков без промперегрева и 24 МПа, 510 °С – для блоков с промперегревом.

3. Показана устойчивость оптимальных решений для зоны количественного регулирования температурного графика при разукрупнении графика электрической нагрузки. Показано, что турбины типа ПТ в этих условиях более устойчивы благодаря постоянной загрузке производственного отбора пара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пугач Л.И., Ноздренко Г.В.* Развитие теплофикации в рыночных условиях // Экологически перспективные системы и технологии: сборник научных трудов. – Новосибирск, 1999. – С. 44–48.

2. *Андрющенко А.И.* Комбинированные системы энергоснабжения // Теплоэнергетика. – 1997. – № 5. – С. 2–7.

3. *Андрющенко А.И.* Новые высокоэффективные системы теплоснабжения // Материалы Межвузовского научного семинара по проблемам теплоэнергетики: сборник научных трудов. – Саратов: СГТУ, 1996. – С. 19–21.

4. *Андрющенко А.И.* Проблемы развития энергетики России // Проблемы повышения эффективности и надежности систем теплоэнергоснабжения. – Саратов: СГТУ, 1999. – С. 3–6.

5. *Петрушкин А.В.* Эффективность комбинированных систем теплоснабжения: автореф. дис. … канд. техн. наук. – Саратов, 1998. – 18 с.

6. Методы повышения эффективности и обеспечения надежности систем теплоэнергоснабжения / А.Ф. Печников, Е.А. Ларин, А.В. Щурихин, Р.В. Замоторин // Проблемы повышения эффективности и надежности систем теплоэнергоснабжения. – Саратов: СГТУ, 1999. – С. 89–91.

7. *Печников А.Ф., Ларин Е.А.* Методики расчета экономии топлива в комбинированных системах теплоснабжения // Вопросы совершенствования региональных энергетических систем и комплексов. – Саратов: СГТУ, 1999. – С. 103–110.

8. *Андрющенко А.И.* Экономия топлива от применения теплонасосных установок в системах теплоснабжения // Вопросы совершенствования региональных энергетических систем и комплексов. – Саратов: СГТУ, 1999. – С. 4–9.

9. *Монакова Т.И.* Анализ схемы использования сбросной теплоты ТЭС методом сравнения потерь эксергии // Теплоэнергетика. – 1984. – № 9. – С. 35–37.

10. *Николаев Ю.Е.* Эффективность различных источников энергоснабжения для покрытия малых тепловых нагрузок // Проблемы повышения эффективности и надежности систем теплоэнергоснабжения. – Саратов: СГТУ, 1999. – С. 35–38.

11. *Франк М.И.* Выбор рациональной стратегии развития автономных энергосистем: автореф. дис. … канд. техн. наук. – Иркутск, 1999. – 23 с.

12. *Grosmann U.* Thermodynamische und wirtschaftliche Bewertung bivalenter Heizsysteme. – Hannover, 1985. – 155 p.

13. District heating and cooling utilizing temperature differences of Chicago waters / D.J. Santini, A.A. Frigo, G.T. Kartsounes, W. Harrison // Energy use management: proceedings of the International Conference, Tucson, Arizona, 1977. – New York: Pergamon Press, 1977. – Vol. 2. – P. 425–430.

14. *Svedinger B., Simonsson B.* Effective energy system med ny method för dimensionering av värmelager // VVS och energy. – 1986. – N 12. – P. 48–52.

15. Utility taps waste heat // Engineering News-Record. – 1981. – N 11. – P. 15.

16. *Огуречников Л.А.* Обоснование направлений развития низкотемпературных энергосберегающих технологий: автореф. дис. … д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1999. – 36 с.

17. *Петин Ю.М. Накоряков В.Е.* Тепловые насосы // Проблемы энергосбережения и рационального использования энергоресурсов в Сибирском регионе. – Новосибирск, 1999. – С. 54–64.

18. Комплексное исследование систем централизованного теплоснабжения с использованием внутриквартальных абсорбционных тепловых насосов и одно- и двухмагистральных тепловых сетей / В.Г. Томилов, Г.В. Ноздренко, П.А. Щинников, Ю.Л. Пугач // Теплоэнергетика: физико-технические и экологические проблемы, новые технологии, технико-экономическая эффективность. – Новосибирск, 2000. – С. 169–186.

19. Обоснование оптимального коэффициента теплофикации малых ТЭЦ с регенеративными ГТУ при включении их в системы теплоснабжения городов / Ю.Е. Николаев, А.Б. Дубилин, А.Н. Мракин, С.В. Сирдюков // Проблемы теплоэнергетики. – Саратов: СГТУ, 2012. – Вып. 2. – С. 135–139.

Щинников Павел Александрович, доктор технических наук, профессор Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: новые технологии в теплоэнергетике и рациональные сферы их применения, исследование перспектив развития электроэнергетики Сибири и Дальнего Востока. Имеет более 200 публикаций. E-mail: tes.nstu@gmail.com

Синельников Денис Сергеевич, студент кафедры тепловых электрических станций Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – теплоэнергетика, новые технологии. Имеет 35 публикаций. E-mail: sinelnikovden@hotmail.com

Shchinnikov Pavel Alexandrovich, D.Sc. (Eng.), professor, Novosibirsk State Technical University. His research interests are focused on new technologies in heat and power engineering and fields of their smart use as well as study of prospects of power engineering development in Siberia and the Far East. He is the author of more than 200 publications. E-mail: tes.nstu@gmail.com

Sinelnikov Denis Sergeevich, a student at the department of heat power stations in Novosibirsk State Technical University. The main fields of his research are heat and power engineering and new technologies.He has published 35 research papers. sinelnikovden@hotmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-115-127

Stability of optimal parameters of CHPPs with the zoning of electrical and temperature charts[*]

P.A. SHCHINNIKOV[a], *D.S. SINELNIKOV*[b]

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] *tes.nstu@gmail.com* [b] *sinelnikovden@hotmail.com*

Abstract

In Russia combined heat and power plants (CHPP) are widely used. At the same time, the central heat source in the form of CHPP, as a rule, was designed for a maximum heat load with the view of its further increase. Such an approach provided significant fuel saving due to the combined generation of electricity and heat. Today, not only do heating plants lack a continuous heat load, but also a significant share of industrial consumers is lost, which leads to an increase in their efficiency. At the same time, recently, the so-called distributed (local, decentralized) systems have actively been developed. This is due to the desire of owners to isolate from the monopoly-supplied heat from CHPPs. These systems develop spontaneously. Centralized and distributed systems coexist outside the strict quantitative estimates of their rational combination. This leads to a surplus of resources, inefficient loading of equipment, access to off-design operating modes, divergence of energy and power balances, increased fuel consumption, and other problems. In all cases, it is the consumer who ultimately suffers. The study of heat and power units is impossible without the use of mathematical modeling. The task of optimization of such systems is among the most complex problems. The purpose of this work is to increase the efficiency of centralized heat sources operating in distributed systems with zoning the temperature chart, as well as checking the stability of solutions. The division of the schedule into zones is proposed according to the principle of regulation of heat supply.

Keywords: exergy approach, zoning of temperature chart, optimization parameters, stability, combined heat and power supply, heating, modelling

[*] *Received 20 November 2018.*

REFERENCES

1. Pugach L.I., Nozdrenko G.V. Razvitie teplofikatsii v rynochnykh usloviyakh [The development of district heating market conditions]. *Ekologicheski perspektivnye sistemy i tekhnologii* [Ecologically perspective systems and technologies]. Novosibirsk, 1999, pp. 44–48.

2. Andryushchenko A.I. Kombinirovannye sistemy energosnabzheniya [Combined heating systems]. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 1997, no. 5, pp. 2–7. (In Russian).

3. Andryushchenko A.I. [New highly efficient heat supply systems]. *Materialy Mezhvuzovskogo nauchnogo seminara po problemam teploenergetiki* [Materials of the interuniversity scientific seminar on the problems of power engineering]. Saratov, SSTU Publ., 1996, pp. 19–21. (In Russian).

4. Andryushchenko A.I. Problemy razvitiya energetiki Rossii [Problems of energy development in Russia]. *Problemy povysheniya effektivnosti i nadezhnosti sistem teploenergosnabzheniya* [Problems of increasing the efficiency and reliability of heat and power supply systems]. Saratov, SSTU Publ., 1999, pp. 3–6.

5. Petrushkin A.V. *Effektivnost' kombinirovannykh sistem teplosnabzheniya*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Efficiency of combined heat supply systems. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Saratov, 1998. 18 p.

6. Pechnikov A.F., Larin E.A., Shchurikhin A.V., Zamotorin R.V. Metody povysheniya effektivnosti i obespecheniya nadezhnosti sistem teploenergosnabzheniya [Methods to improve the efficiency and reliability of heat and power supply systems]. *Problemy povysheniya effektivnosti i nadezhnosti sistem teploenergosnabzheniya* [Problems of increasing the efficiency and reliability of heat and power supply systems]. Saratov, SSTU Publ., 1999, pp. 89–91.

7. Pechnikov A.F., Larin E.A. Metodiki rascheta ekonomii topliva v kombinirovannykh sistemakh teplosnabzheniya [Methods for calculating fuel economy in combined heat supply systems]. *Voprosy sovershenstvovaniya regional'nykh energeticheskikh sistem i kompleksov* [Issues of improving regional energy systems and complexes]. Saratov, SSTU Publ., 1999, pp. 103–110.

8. Andryushchenko A.I. Ekonomiya topliva ot primeneniya teplonasosnykh ustanovok v sistemakh teplosnabzheniya [Economy of fuel from use of heat pump installations in systems of heat supply]. *Voprosy sovershenstvovaniya regional'nykh energeticheskikh sistem i kompleksov* [Issues of improving regional energy systems and complexes]. Saratov, SSTU Publ., 1999, pp. 4–9.

9. Monakova T.I. Analiz skhemy ispol'zovaniya sbrosnoi teploty TES metodom sravneniya poter' eksergii [Analysis of the scheme of using the waste heat of thermal power plants by comparing exergy losses]. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 1984, no. 9, pp. 35–37. (In Russian).

10. Nikolaev Yu.E. Effektivnost' razlichnykh istochnikov energosnabzheniya dlya pokrytiya malykh teplovykh nagruzok [Efficiency of various power supply sources to cover low heat loads]. *Problemy povysheniya effektivnosti i nadezhnosti sistem teploenergosnabzheniya* [Problems of increasing the efficiency and reliability of heat and power supply systems]. Saratov, SSTU Publ., 1999, pp. 35–38.

11. Frank M.I. *Vybor ratsional'noi strategii razvitiya avtonomnykh energosistem*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Choosing a rational strategy for the development of autonomous power systems. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Irkutsk, 1999. 23 p.

12. Grosmann U. *Thermodynamische und wirtschaftliche Bewertung bivalenter Heizsysteme*. Hannover, 1985. 155 p.

13. Santini D.J., Frigo A.A., Kartsounes G.T., Harrison W. District heating and cooling utilizing temperature differences of Chicago waters. *Energy use management: proceedings of the International Conference*, Tucson, Arizona, 1977, vol. 2, pp. 425–430.

14. Svedinger B., Simonsson B. Effective energy system med ny method för dimensionering av värmelager. *VVS och energy*, 1986, no. 12, pp. 48–52.

15. *Utility taps waste heat*. Engineering News-Record, 1981, no. 11, p. 15.

16. Ogurechnikov L.A. *Obosnovanie napravlenii razvitiya nizkotemperaturnykh energosberegayushchikh tekhnologii*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Rationale for the development of low-temperature energy-saving technologies. Author's abstract of Dr. eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 1999. 36 p.

17. Petin Yu.M. Nakoryakov V.E. Teplovye nasosy [Heat pumps]. *Problemy energosberezheniya i ratsional'nogo ispol'zovaniya energoresursov v Sibirskom regione* [Problems of energy saving and rational use of energy resources in the Siberian region]. Novosibirsk, 1999, pp. 54–64.

18. Tomilov V.G., Nozdrenko G.V., Shchinnikov P.A., Pugach Yu.L. Kompleksnoe issledovanie sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya s ispol'zovaniem vnutrikvartal'nykh absorbtsionnykh teplovykh nasosov i odno- i dvukhmagistral'nykh teplovykh setei [Comprehensive study of district heating systems with the use of intra-absorption heat pumps and single- and double-line heating networks]. *Teploenergetika: fiziko-tekhnicheskie i ekologicheskie problemy, novye tekhnologii, tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost'* [Thermal engineering: physico-technical and environmental problems, new technologies, technical and economic efficiency]. Novosibirsk, 2000, pp. 169–186.

19. Nikolaev Yu.E., Dubilin A.B., Mrakin A.N., Sirdyukov S.V. Obosnovanie optimal'nogo koeffitsienta teplofikatsii malykh TETs s regenerativnymi GTU pri vklyuchenii ikh v sistemy teplosnabzheniya gorodov [Substantiation of the optimal coefficient of heat supply of small CHP plants with regenerative gas turbines when they are included in the heat supply systems of cities]. *Problemy teploenergetiki* [Problems of heat power system]. Saratov, SSTU Publ., 2012, vol. 2, pp. 135–139.

Для цитирования:

Щинников П.А., Синельников Д.С. Устойчивость оптимальных параметров теплофикационных энергоблоков при разукрупнении графиков электрических и тепловых нагрузок // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 4 (73). – С. 115–127. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-4-115-127.

For citation:

Shchinnikov P.A., Sinelnikov D.S. Ustoichivost' optimal'nykh parametrov teplofikatsionnykh energoblokov pri razukrupnenii grafikov elektricheskikh i teplovykh nagruzok [Stability of optimal parameters of CHPPs with zoning of electrical and temperature charts]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 4 (73), pp. 115–127. doi: 10.17212/1814-1196-2018-4-115-127.

Правила для авторов

Журнал «Научный вестник НГТУ» основан в 1995 году на базе Новосибирского государственного технического университета. Печатная версия журнала зарегистрирована в Министерстве РФ по делам печати, телевещания и средств массовых коммуникаций в 2000 году. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1599 от 10.02.2000 года. Периодичность выхода издания – один раз в три месяца (четыре номера в год). Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование.

В журнале «Научный вестник НГТУ» публикуются оригинальные статьи по следующим группам специальностей:

05.11.00 – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы;

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы;

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям);

05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения;

05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление;

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям);

05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей;

05.13.17 – Теоретические основы информатики;

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ;

05.14.00 – Энергетика;

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы;

05.14.12 – Техника высоких напряжений;

05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты.

Разделы журнала: приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; информатика, вычислительная техника и управление; энергетика.

Рекомендуемый объем статьи 10–16 страниц. Статьи объемом, не превышающим 8 страниц, могут быть размещены в разделе «Краткие сообщения». Возможна публикация дискуссионного материала в разделе «Дискуссии». В информационном разделе возможно размещение сообщений о состоявшихся и планируемых конференциях, семинарах и симпозиумах, сведений о факультетах и специальностях, научных разработках и научных школах. Статьи обзорного характера, как правило, не публикуются.

Website: http://journals.nstu.ru/vestnik

Условия приема статей

В редакцию **Научного вестника НГТУ** представляются следующие материалы.

1. Статья, подготовленная в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, два экземпляра, подписанных авторами.
2. Контактная информация (телефоны рабочий и сотовый, адреса электронной почты, место работы, адрес места работы, должность, ученая степень, ученое звание автора, ORCID) – печатная версия, два экземпляра.
3. Описание статьи для базы данных «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)», подготовленное в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, один экземпляр.
4. Лицензионный договор, заполненный и подписанный, отправляется со всем пакетом документов; сканированный заполненный договор записывается на диск.
5. Электронная версия статьи, контактной информации, описания статьи для базы данных РИНЦ и сканированный лицензионный договор – в отдельных файлах на CD.
6. Экспертное заключение о возможности опубликования.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Требования к оформлению статьи

Формат оригиналов **– А4**. Шрифт **– Times New Roman**. Текст набирается в русифицированном редакторе **Microsoft Word**. Параметры страницы (см):

левое поле – 3,3 верхнее поле – 4,0

правое поле – 3,3 нижнее поле – 3,9

текстовое поле 22 × 14,4

Межстрочные интервалы одинарные. Перед УДК оставляется четыре пустые строки размером 12. УДК набирается прописными буквами кеглем 8. После УДК перед заголовком оставляется пустая строка размером 8. Название статьи набирается кеглем 14 полужирным строчным шрифтом с отступом слева 1,8 см, без переносов слов с выравниванием влево. После заголовка оставляется пустая строка размером 12. Фамилии автора – прописным шрифтом кеглем 8. После фамилий оставляется пустая строка размером 7. Указатель сноски * после названия статьи устанавливается в верхнем индексе. В сноске дата поступления статьи указывается курсивным шрифтом кеглем 8. После ФИО авторов статьи набирается аннотация кеглем 8 с отступом первой строки на 0,8 см, с межстрочным интервалом с множителем 1,1. После аннотации оставляется пустая строка размером 4. **Ключевые слова** – кеглем 8.

Заголовки разделов обязательны (например, **Введение**, **Постановка задачи**, **Методы анализа**, **Основной результат**, **Выводы** или **Заключение**) – прописным полужирным прямым шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними оставляется пустая строка размером 20, после них – пустая строка размером 10. Основной текст – кеглем 10.

Подзаголовки – прописным полужирным шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними и после них – пустая строка размером 10.

Рисунки представляются в **Corel Draw 11** или **Microsoft Word (RUS)**. Рисунки в других редакторах не принимаются. Слово *Рис*. и его номер выделяются курсивом. Рисунки должны быть черно-белыми, в подписях не должно быть ссылок на цвет.

Рисунки и таблицы нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. После номера должно следовать название **на русском и английском языках**. Подрисуночные надписи и названия таблиц – кеглем 9.

Все графы в таблицах должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями. В головке таблиц по возможности указываются буквенные обозначения параметров и их единицы измерения.

Переменные в тексте – курсивным шрифтом кеглем 10. При написании формул использовать MathType версии не выше 6.0C. Формулы набирать по центру кеглем 11, надстрочные и подстрочные индексы – кеглем 9, знаки – кеглем 14 (латинские буквы курсивным шрифтом, русские и греческие – прямым, цифры – прямым).

Например:

$$A(s) = \sum_{i=0}^{n^2+3} A_i s \lambda^{(i+1)^2} + \alpha .$$

Между текстом и формулами, а также между формулами оставляются пустые строки размером 4. Формулы не сжимать. Нумерацию формул помещать справа кеглем 10. Например:

$$D_f = D_c D + N_c N. \qquad (1)$$

Нумерация страниц осуществляется следующим образом: Вставка / Номера страниц...; установить **положение** «вверху страницы», **выравнивание** – «снаружи», без нумерации первой страницы.

Колонтитулы устанавливаются вверху (с отступом от верхнего края страницы 3 см). Чтобы колонтитулы на четной, нечетной и первой страницах отличались, нужно установить: Файл / Параметры страницы / Разметка; установить **разные четные и нечетные** и **первая отличается**.

Колонтитулы на четных страницах. Вид / Колонтитулы; набираются курсивным прописным шрифтом кеглем 8. Фамилия автора с инициалами впереди у правого края без отступа. Если авторов несколько, то указываются только два первых, далее «и др.».

Колонтитулы на нечетных страницах. Названия статьи – с прописной буквы курсивным шрифтом кеглем 8. Номера страниц – кеглем 10.

Перед списком литературы пропускается пустая строка размером 20. Заголовок «Список литературы» – кеглем 8 прописным полужирным шрифтом с отступом 1,8 см. После списка литературы – пустая строка размером 10. Порядковый номер – с красной строки кеглем 8 с интервалом 1,1. Фамилии и инициалы – кеглем 8 полужирным строчным шрифтом, название статьи (книги) – светлым тем же шрифтом. Оформление библиографического списка – по ГОСТ Р.7.0.5–2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. – М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с.

После списка литературы идет пустая строка размером 24. Далее приводятся краткие сведения об авторах кеглем 8 с интервалом 1,1 и с отступом от левого края 1 см. Фамилия, имя, отчество – с красной строки курсивом. Последующий текст (ученая степень, ученое звание, членство в академиях и т. д.; основное направление научных исследований; количество имеющихся публикаций, в том числе монографий, учебных пособий, e-mail, рабочий телефон) – прямым шрифтом. **Информация предоставляется на русском и английском языках.**

Далее дается перевод на английский язык фамилии, имени, отчества автора и названия статьи, а также реферата и ключевых слов (обязательно).

Исправления, вносимые автором, при доработке статьи **выделять** желтым цветом.

Требования к оформлению РИНЦ

В описании статьи должна быть указана следующая информация.

1. Номера страниц, на которых размещена статья в сборнике.
2. Коды: УДК и / или ББК, и / или DOI, и / или других классификационных индексов или систем регистрации.
3. Название статьи.
4. Фамилия, имя, отчество авторов.
5. Место работы каждого автора в именительном падеже. Указать должность автора по основному месту работы.
6. Контактная информация (почтовый адрес места работы, номер телефона, адрес электронной почты – обязательно).
7. Аннотация (не менее 320 и не более 640 знаков).
8. Ключевые слова: каждое слово или словосочетание отделяется от другого запятой (10–20 слов).
9. Пункты 3–8 на английском языке.
10. Список литературы.

Образец оформления приведен на сайте http://vestnik.infoterra.ru/index.php