

1

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

MODELLING AND DATA ANALYSIS

SCIENTIFIC JOURNAL

2020

ISSN: 2219-3758

ISSN: 2311-9454 (ONLINE)

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

2020 • Том. 10 • № 1

MODELLING AND DATA ANALYSIS

SCIENTIFIC JOURNAL

2020 • Vol. 10 • № 1



Московский государственный
психолого-педагогический университет
Moscow State University
of Psychology & Education

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор – Л.С. Куравский

Заместители главного редактора – С.Д. Кулик, А.В. Пантелеев

Члены редакционной коллегии – К.К. Абгарян, Г.Г. Амосов, М.В. Воронов, Е.Л. Григоренко (США), В.К. Захаров, А.И. Кибзун, Л.М. Либкин (Великобритания), В.Р. Милов, А.В. Наумов, Д.Л. Ревизников, Х. Холлинг (Германия), Д. Фрэнсис (США), К.В. Хорошенко (Великобритания), Г.А. Юрьев

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель редакционного совета – Г.Г. Амосов

Члены редакционного совета – В.А. Барабанщиков, П. Бентлер (США), А.В. Горбатов, Л.С. Куравский, Л.М. Либкин (Великобритания), А.А. Марголис, В.В. Рубцов, Д.В. Ушаков, Д. Фрэнсис (США)

Ответственный секретарь – Н.Е. Юрьева

Издаётся с 2011 года

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный психолого-педагогический университет»

Адрес редколлегии:

г. Москва, ул. Сретенка, 29, факультет информационных технологий

Тел.: +7 (499) 167-66-74

E-mail: mad.mgppu@gmail.com

Журнал зарегистрирован в Государственном комитете РФ по печати.

Свидетельство о регистрации средств массовой информации

ПИ № ФС77-52058 от 7 декабря 2012 года

ISSN: 2219-3758

ISSN: 2311-9454 (online)

© ФГБОУ ВО «Московский государственный психолого-педагогический университет», 2020.
Все права защищены. Любая часть этого издания не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения редакционной коллегии. Правила оформления рукописей, направляемых в редакцию журнала, высылаются по запросу по электронной почте.



Мельничук А.В., Судаков В.А.

Применение онтологического подхода к процессу разработки и внедрения систем Electronic Flight Bag 157

Мосин И.С.

Мобильное приложение DiaPsy для улучшения самоконтроля диабета и психологической поддержки людей с сахарным диабетом 1 типа..... 166

Нуркаева И.М., Корчагина К.А.

Информационная система для учебно-методической поддержки дисциплины «Численные методы линейной алгебры» 176

МЕТОДИКА ОБУЧЕНИЯ

Жаркова О.Г.

Геймификация обучения на примере разрабатываемой видеоигры для изучения таблицы умножения «Умножай с лисой» 189



Mosin I.S.

The DiaPsy Mobile App for Improving Self-Control
of Diabetes and Psychological Support for People with Type 1 Diabetes 175

Nurkaeva I.M., Korchagina K.A.

Information System for Educational and Methodological
Support of the Discipline “Numerical Methods of Linear Algebra” 188

TEACHING METHODOLOGY

Zharkova O.G.

Gamification of Training on the Example of a Video Game
Being Developed to Study the Multiplication Table “Multiply with the fox” 196

◇◇◇◇МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ◇◇◇◇

УДК 351.8, 629.7

Evaluating the Contribution of Human Factor to Performance Characteristics of Complex Technical Systems

Kuravsky L.S. *

MSUPE, Moscow, Russia,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3375-8446>,
e-mail: l.s.kuravsky@gmail.com

Yuryev G.A. **

MSUPE, Moscow, Russia,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2960-6562>,
e-mail: g.a.yuryev@gmail.com

Zlatomrezhev V.I. ***

GosNIIAS, Moscow, Russia,
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1776-6881>
e-mail: vizlatomr@2100.gosniias.ru

Yuryeva N.E. ****

MSUPE, Moscow, Russia,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1419-876X>,
e-mail: yurieva.ne@gmail.com

Mikhaylov A.Y. *****

GosNIIAS, Moscow, Russia,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0278-1819>
e-mail: aymihaylov@2100.gosniias.ru

For citation:

Kuravsky L.S., Yuryev G.A., Zlatomrezhev V.I., Yuryeva N.E., Mikhaylov A.Y. Evaluating the Contribution of Human Factor to Performance Characteristics of Complex Technical Systems. *Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis*, 2020. Vol. 10, no. 1, pp. 7–34. DOI: 10.17759/mda.2020100101

****Kuravsky Lev Semenovich***, DSc (Engineering), Professor, Dean of Computer Science Faculty, Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russia, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3375-8446>, e-mail: l.s.kuravsky@gmail.com

*****Yuryev Grigory Aleksandrovich***, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of Scientific Laboratory, Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2960-6562>, e-mail: g.a.yuryev@gmail.com

******Zlatomrezhev Valentin Igorevich***, Head of Laboratory, State Research Institute of Aviation Systems (GosNIAS), Moscow, Russia, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1776-6881>, e-mail: vizlatomr@2100.gosniias.ru



Estimating the influence of human factor on the activity of operators of complex technical systems is an important problem for condition monitoring, personnel training and diagnostics. Presented are both an overview and mutual comparisons of the approaches which are useful to reveal the effect of human factor and have already shown their performances in practical applications. Under consideration are: the structural equation modeling, the Bayesian estimations for probabilistic models represented by Markov random processes, the multivariate statistical techniques including the discriminant and cluster analysis as well as wavelet transforms.

Keywords: Operators of complex technical systems, human factor, condition monitoring, factor analysis, structural equation modeling, Markov random processes, wavelet transform, multivariate statistical techniques, principal components analysis, multidimensional scaling, cluster analysis.

****Yuryeva Nataliya Evgenievna*, PhD (Engineering), Research fellow, Moscow State University of Psychology and Education, Research Associate, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1419-876X>, e-mail: yurieva.ne@gmail.com

****Mikhaylov Artem Yurievich*, Engineer, State Research Institute of Aviation Systems (GosNIAS), Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0278-1819>, e-mail: aymihaylov@2100.gosniias.ru

1. INTRODUCTION

Estimating the influence of human factor on the activity of operators of complex technical systems is an important problem for condition monitoring personnel training and diagnostics. Presented are the approaches which are useful to reveal the effect of human factor and have already shown their performances in practical applications. Under consideration are both the structural equation modeling presented in Section 2 and the multivariate statistical techniques as well as Bayesian estimations for probabilistic models based on Markov random processes, which are presented in Section 3. The first approach is intended for revealing influences of human factor on variances of observed characteristics whereas the second one recognizes influences of training level and psychophysiological state of operators of complex technical systems on their activity performance.

As a rule, available parameters measured for condition monitoring do not represent characteristics of a system under study in the mode that is suitable directly for understanding system status and formulating reliable conclusions sufficient for proper diagnostics. For multivariate measurements, which condition monitoring usually deals with, it is important to reveal some latent factors responsible for joint variability of observed measurable parameters, determine their nature and scope of influences, and use the obtained information to identify system condition.

It is desirable to replace the parameters those are easy to measure by the parameters those are easy to interpret and understand the system behavior, with minimal information losses being expected during this data mining. Functional relationships between revealed factors and observed parameters are also to be determined for further analysis. As a result of this study, a researcher should get the structure of causal connections between revealed factors and observed variables as well as immediate factor values to differentiate system status, if necessary.

To meet all the indicated requirements, empirical mathematical models and corresponding methods of multivariate statistical analysis were developed [3-4, 13, 33, 37].



The most appropriate in the discussed situation are exploratory and confirmatory factor models and methods of their analysis. Both approaches are based on the analysis of sample covariance or correlation matrices of the observed parameters under study. The exploratory analysis assumes unknown number of uncorrelated factors with a priori undetermined interpretation¹, whereas the confirmatory one assumes the factors, their interpretation, causal connections with observed variables and correlation connections between latent factors to be known beforehand. Confirmatory models also admit a convenient technique for estimating statistical significance of each their component.

Since substantial hypotheses of the reasons of possible influences on the observed variables are usually available in practice, the latter approach is preferable.

Nevertheless, condition monitoring usually needs to take into account time dynamics of observed parameters, with their magnitudes for different time points being formally interpreted as different quantities to be analyzed. To comply with this demand, the simplex method of the structural equation modelling was developed [16]. However, it has serious inherent limitations, which frequently make its practical applications questionable, viz.: capacity of studying factor interaction for adjacent checkpoints only, impossibility of associating factors with time periods, acceptability for analysis of covariance/correlation matrices with simplex structure merely, etc. Besides, the traditional structural equation modelling has its own intrinsic defect. It needs solution of the laborious local multivariate optimization problem to estimate the values of free model parameters that brings about impossibility of the global minimum estimation and ambiguous solution.

To overcome these problems, an approach combining capabilities of both wavelet transforms and trained confirmatory factor structures was developed. Its features and advantages, including the possibility of finding the values of free model parameters by direct (non-iterative) methods ensuring an unambiguous optimal solution, flexible capacity of studying factor interaction, applicability for the analysis of arbitrary covariance/correlation matrices et al., are presented in Section 2.

Presented in Section 3 is the approach for supporting the outcome grading for activities of operators of complex technical systems. It is based on comparisons of current exercises with the activity database patterns in the wavelet representation metric associated with observed parameters as well as on probabilistic assessments of skill class recognition using sample distribution functions of exercise distances to cluster centers in a scaling space and Bayesian likelihood estimations with the aid of probabilistic profile of staying in activity parameter ranges. These techniques have demonstrated the capabilities of recognizing sets of abnormal exercises in the scaling spaces with the wavelet coefficient metric and detection of parameters characterizing operator mistakes to reveal the causes of abnormality. The techniques presented overcome limitations of existing methods and provide advantages over manual data analysis since they greatly reduce the combinatorial enumeration of the options considered.

An objective assessment of activity performance is essential for training process of operators of complex technical systems. One of the critical aspects here is development of the training evaluation criteria. The objective data based on trainee activity character-

¹ Factors are usually interpreted using variables, which they are connected with: to identify a factor it is necessary to assign it a name generalizing the meanings of relevant variables.



istics may be an effective indicator for objective judging of the level of training effectiveness and skills obtained after training. So, in demand are computer-aided diagnostics techniques that can be employed for selection of operator candidates to estimate the level of building-up of knowledge, ability and skills. These techniques can raise objectivity, informational content and accuracy of estimations together with standardization and automation of measurements. Of special importance are development and analysis of new approaches which are used to estimate level of training and psychophysiological state of operators. The principal focus area in this regard is diagnostics as a result of work on contemporary *simulators* where special conditions are worked out.

By now, a certain amount of results related to selection of abnormal exercise implementations has been accumulated [2, 7, 8-12, 14, 15, 18, 34-36, 41, 43-44].

Presented are the techniques for skill assessments associated with relevant activity data obtained with the aid of both experiments and mathematical analysis of their results. As a result of its application, classes of skills should be determined using activity parameters and operator actions revealed during exercises.

The presented approach is developed to support assessment process. To evaluate the data under study an activity record database is required, in which patterns of training data representing exercise implementations by different operator crews are collected. A *pattern* in question is a representation of a certain activity fragment to be analyzed, which is referred to as an *exercise*, via the set of parameters describing this exercise. These patterns are to be related to one of the recognizable skill classes of trainees.

Collected training data should include exercise parameters as well as relevant expert instructor's assessment/supervision comments from different sources including various types of activity simulators (mobile, motionless, etc.), virtual reality systems and real operator work. The expert comments in use should reveal weak points of operator performance using information about typical mistakes in terms of activity parameters and advices to a local instructor how to correct these weaknesses. Certain attributes related to recognizable classes can be stored in the database both for cluster centers of patterns belonging to the classes under consideration and for each exercise pattern to solve application problems of interest.

General assumption of the approach in use is that the activities implemented in different styles and quality as well as exercises of different types can be discriminated in the multi-dimensional space formed by wavelet coefficient representation. This statement is proved by computer experiments based on the exercises implemented on a simulator. The general method that results from this conclusion is pattern selection.

After an operator completes a certain test exercise, then, in order to collect a meaningful data set representing his results accumulated by some time check point, the following quantities are to be calculated with the aid of the given database:

- Distances to cluster centers of patterns belonging to recognizable classes, which are determined in the metric associated with the wavelet representations of observed parameters, together with the sample distribution functions of distances to centers of such clusters;
- The nearest pattern in the same metric, following to which the relevant attributes are ascribed to the operator under assessment.

The fragment of exercise results must be comparable with patterns in the database in terms of the number of test exercises under consideration and the time of their implementation.

Presented techniques make it possible to carry out quantitative and qualitative assessments of skill class, which are based on three ways, viz.:

- direct comparison of current exercises with the activity database patterns in the wavelet representation metric associated with observed parameters (selecting activity database patterns in the wavelet representation metric), which is considered as a basic technique as well as on
- probabilistic assessment of skill class recognition using both sample distribution functions of exercise distances to cluster centers in a scaling space (selecting a skill class using exercise distributions in a scaling space), which is considered as a supportive technique, and
- Bayesian likelihood estimation (selecting a skill class with the aid of probabilistic profile of staying in activity parameter ranges), which is also considered as a supportive technique.

The techniques presented provide tremendous advantages over manual data analysis since they greatly reduce the combinatorial enumeration of the options considered.

The proposed techniques differ significantly from the probabilistic methods applied for system control, predictive diagnostics of technical failures, condition monitoring and operator activity support [17].

2. STRUCTURAL EQUATION MODELING

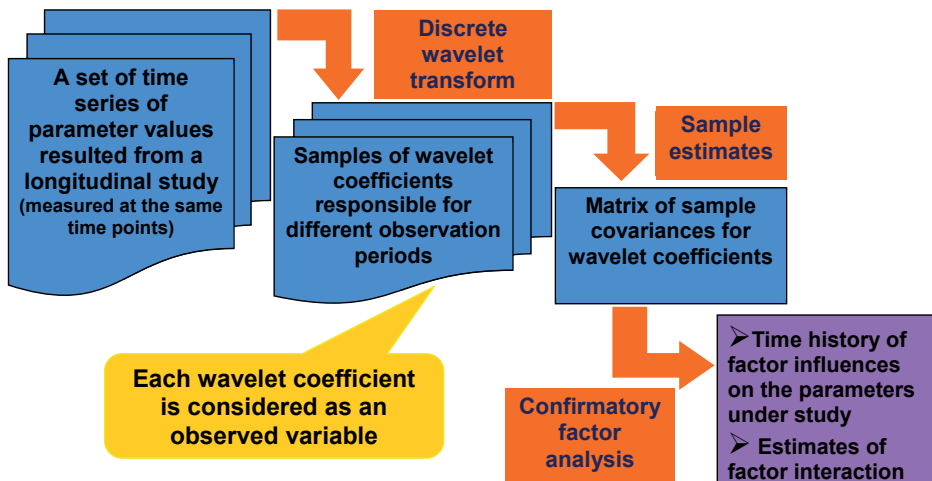


Figure 1. Principal stages of the analysis

Principal stages of the structural equation modeling are presented in Figure 1. This technology combines capabilities of wavelet transforms and trained factor structures. According to the proposed approach, the samples of coefficients resulted from discrete wavelet transform of initial parameter time series under study and responsible for different observation periods are considered as values of observed variables in the subsequent structural equation modelling to reveal time history of factor influences and estimates of factor interaction. Data representation created with the aid of wavelet transforms makes it possible to reveal differences in process characteristics for diverse scales. Identification of free factor



model parameters (usually factor variances and covariances) is carried out by a new direct (noniterative) procedure based on the maximum likelihood method, which is an alternative to traditional local iterative solution of optimization problems.

2.1. Principal Components of the Technology: Wavelet Transforms

Monitoring process representation to be analyzed is created with the aid of wavelet transforms. These transforms make it possible to reveal differences in process characteristics for diverse scales, with the process features being available for analysis in different time points of some interval under study. If the dependence under test is a usual one-variable function, resulting wavelet-spectrum is the function of two arguments, viz.: scale parameter characterizes oscillation time cycles whereas shift parameter – time displacements. Wavelet-spectra are calculated using wavelets, which are special functions in the form of short waves with both zero integral value and localization along the axis of the independent variable, which are able to shift along this axis as well as to scaling (stretching/contraction.)

Wavelet-analysis has clear superiority over the traditional spectral analysis since it yields correct representation in case of transition (non-stationary) processes and keeps more useful information about the object behavior under study. These and other advantages have made the approach in question very popular among researchers of different specialties now. Its discrete variant is used here to represent initial data patterns in the form of points of a certain metric functional space with a wavelet-basis. This representation is necessary for a recognition procedure described below.

2.2. Principal Components of the Technology: Alternative Variant of the Structural Equation Modelling

Principal components of the structural equation modelling are presented in Figure 2.

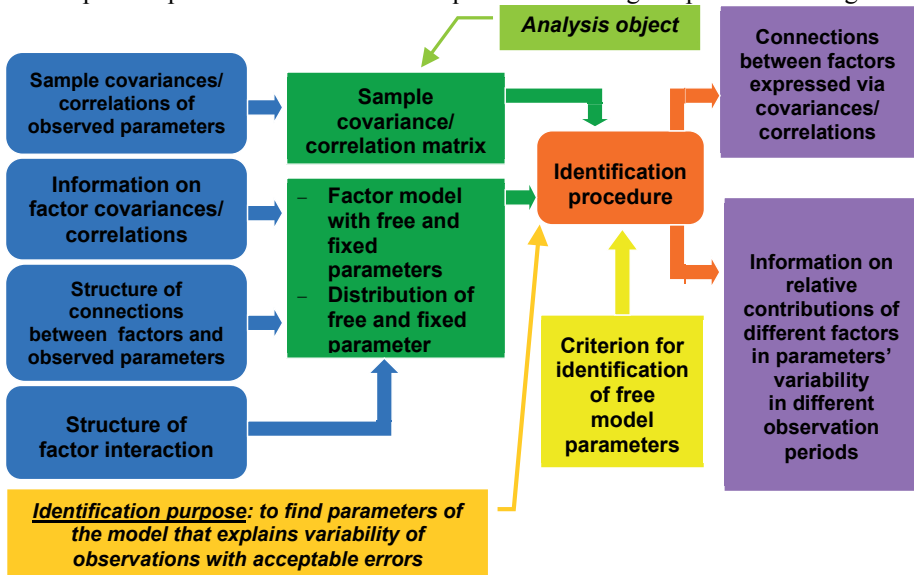


Figure 2. Principal components of the structural equation modelling



Note. In case of several types of observed random processes a mixed covariance matrix for wavelet coefficients is formed.

2.2.1. Traditional Structural Equation Modelling

Strictly determined factor model of the phenomenon under study is assumed in the traditional structural equation modelling. A factor model that connects latent and observed variables is formed using knowledge about the application domain. The hypotheses concerning the model structure have to be based on the analysis of the investigated factors nature (that is to say, both theory and observations are taken into account) [37]. It is admissible to formulate quantitative assumptions concerning correlations between latent variables as well as factor loadings. Free model parameters are calculated to get the best approximation of correlation (covariance) matrices for observed variables (from the viewpoint of a given criterion).

Objects of the traditional structural equation modelling are correlation or covariance matrices for observed variables. Analysis purpose is to find model parameters that explain variability of observations with acceptable errors.

Structural equation modelling has a following peculiarities:

- Nonzero (free) factorial loadings in the equations of model and number of investigated factors are defined in advance
- Correlation between errors of measurements are possible
- Factor loadings and covariances between latent variables can be free model parameters or be equal to the given constants
- The analysis of several model groups is supposed
- It is possible to check whether the given restrictions meet observation results
- Possibility of checking hypotheses about model properties by selecting optimum values of free parameters
- Estimations of free parameters are determined by the maximum likelihood method.

Using the maximum likelihood method the following statistic is to be minimized as a criterion for selection of free parameters:

$$F = [\ln |\Sigma| - \ln |S| + \text{tr}(S\Sigma^{-1}) - m] (N-1),$$

where S – sample covariance matrix for observed variables, Σ – expected covariance matrix for observed variables, $|\Sigma|$ and $|S|$ – determinants of matrices Σ and S , $\text{tr}(S\Sigma^{-1})$ – trace of matrix $(S\Sigma^{-1})$, N – size of the sample used to calculate matrix S , m – number of observed variables [33].

Elements of the expected covariance matrix are analytical expressions consisting of free model parameters. In case of multivariate normalcy of observed variables values of the statistic F are distributed as χ^2 .

Thus, to estimate the values of free model parameters it is necessary to solve numerically a sufficiently laborious local multivariate optimization problem by the iteration methods. In general case, this way results in impossibility of the global minimum estimation, since one of the possible local minima depending on its initial approximation is usually found. Consequently, the solution is ambiguous.



2.2.2. Alternative Variant of the Structural Equation Modelling: General Principles of the Approach

Since the traditional structural equation modelling expects decision of the laborious local multivariate optimization problem to estimate the values of free model parameters that results in impossibility of the global minimum estimation and solution ambiguities. Proposed alternative variant of the structural equation modelling allows to find the values of free model parameters by direct (noniterative) methods ensuring an unambiguous optimal solution.

Expressing observed variances and covariances via free factor variances and covariances with the aid of a factor model, in the alternative variant of the structural equation modelling it is proposed:

- To compose overdetermined sets of equations;
- To solve them by a direct (noniterative) method using a certain form of the maximum likelihood approach, which is different from the one used in the structural equation modelling [20];
- To examine for the adequacy of the obtained equation sets to observations with the aid of statistical goodness-of-fit tests.

To avoid solving nonlinear equation sets as respects correlation coefficients and factor loadings the variance component's path model in which path coefficients (factor loadings) equal to unity is used.

Hereinafter, each observed variance and covariance is associated with an equation that expresses analytically their expected value via free variances and covariances of latent variables and equates it with the corresponding sample estimation [20]. In particular, tracing rules of the path diagram² analysis may be used for that. Detour begins against a causal relationship, then change of a direction on covariance communications, and then movement along a causal relationship. It is necessary to remember also, that covariance communication cannot be bypassed twice. As a result the set of the equations is obtained, in which number of the equations equals to the number of observed variances and covariances. If this number of equations exceeds the number of free model parameters, the overdetermined set of equations is the case that is necessary for the further decision. The method under consideration needs also multivariate normalcy of observed variables.

Let us represent the obtained overdetermined set of equations in matrix notation:

$$\mathbf{Ax}=\mathbf{b},$$

where \mathbf{A} – system nHm matrix, which coefficients are determined using the factor model (path diagram) under consideration; \mathbf{b} – column $nH1$ vector of variance and covariance sample estimates, which are determined using observation results; \mathbf{x} – column $mH1$ vector of unknown free model parameters of interest (viz.: variances and covariances for latent variables).

Now, let us consider the vector $\varepsilon=\mathbf{Ax}_*-\mathbf{b}$ that represents the residual of pseudosolution \mathbf{x}_* of the overdetermined system obtained by the least- squares method. Assuming in the general case that components of the residual vector are correlated let us express their nonsingular covariance matrix as $\sigma^2\mathbf{V}$.

² In path diagrams, ovals (circles) correspond to latent factors, rectangles correspond to observed variables, unidirectional arrows correspond to causal relationships, double-headed arrows correspond to covariances, variances or correlations.



After substitutions vector \mathbf{b} and matrix \mathbf{A} can be expressed the following way:

$$\mathbf{b}=\mathbf{V}^{1/2}\mathbf{b}_0 \text{ and } \mathbf{A}=\mathbf{V}^{1/2}\mathbf{A}_0,$$

where $\mathbf{V}=\mathbf{V}^{1/2}\mathbf{V}^{1/2}$. The only symmetric nonnegatively defined matrix $\mathbf{V}^{1/2}$, which is called the square root of \mathbf{V} , exists for every symmetric nonnegatively defined covariance matrix \mathbf{V} , so that $(\mathbf{V}^{1/2})^2=\mathbf{V}$.

Thus, let us turn to the set:

$$\mathbf{A}_0\mathbf{x}=\mathbf{b}_0,$$

for which the covariance matrix of the residual vector $\epsilon_0 = \mathbf{V}^{-1/2}\epsilon$ looks like $\sigma^2\mathbf{E}$ where \mathbf{E} is identity matrix.

Whether now it is necessary to define is the given pseudosolution a maximal likelihood estimation. It will occur, if following conditions will be satisfied. First, the system should be nonsingular, that is $rank \mathbf{A}=\mathbf{m}$, where \mathbf{m} is the number of free model parameters. Secondly, a vector are residual \mathbf{e}_0 should have multivariate normal distribution.

If these conditions are satisfied, the pseudosolution is a maximum likelihood estimation. The pseudosolution is calculated by the least squares method using the formula:

$$\mathbf{x}_* = (\mathbf{A}_0^T\mathbf{A}_0)^{-1}\mathbf{A}_0^T\mathbf{b}_0 = (\mathbf{A}^T\mathbf{V}^{-1}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{V}^{-1}\mathbf{b}.$$

At that the statistics

$$\mathbf{X}^2=(\mathbf{b}_0-\mathbf{A}_0 \mathbf{x}_*)^T(\mathbf{b}_0-\mathbf{A}_0 \mathbf{x}_*)/s^2=(\mathbf{b}-\mathbf{A} \mathbf{x}_*)^T\mathbf{V}^{-1}(\mathbf{b}-\mathbf{A} \mathbf{x}_*)/s^2$$

has χ^2 -distribution with $n-m$ degrees of freedom.

Last statistics makes it possible to check the model validity. Under the assumptions indicated above, the presented statistics \mathbf{X}^2 makes it possible to test the hypothesis of representability of sample variances and covariances constituting the vector \mathbf{b} with the aid of variances and covariances of latent variables contained in the model under study. Acceptance region is $\mathbf{X}^2 \leq \chi^2_{n-m;\alpha}$ where α is criterion significance level.

At realization of the given approach the necessary simplifications shown in features of the decision are made:

1. Components of the residual vector \mathbf{e} are assumed to be uncorrelated;
2. Mean-square deviation values of different components of the vector \mathbf{e} are set equal to the same fixed proportion (percentage) of the corresponding components of the vector \mathbf{b} (the hypothesis of proportionality);
3. The mentioned proportion (percentage) is selected to realize the equality $\mathbf{X}^2 \leq \chi^2_{n-m;\alpha}$ at the significance level $\alpha=0.05$, after that the admissibility of this quantity is evaluated. (It is convenient to evaluate the level of this characteristics having determined its reasonable critical value, for example 0.1. Thus, a new criterion (critical percentage) appears instead of the significance level.

Advantages of the suggested technique are:

- The solution of a problem is not reduced to the local multivariate optimization
- The new way of a choice of adequate model where the percent of mistakes is estimated via the estimation of a residual vector
- Since this method is direct there is no multiplicity of solutions
- No need in search of global minima.



Taking into account that the direct method of solution allows studying laws of interrelations easily, connections between free parameters of the factor model have been investigated, namely: numerical estimations of certain parameters for the given combinations of other ones with the aid of a matrix formula were carried out to reveal the dependencies of interest.

Since no special contingencies are provided for positiveness of calculated variance values and correct dependencies between connected covariances and variances, these quantities may possess incorrect values for some models. In this case vector \mathbf{x}_c that meets the given conditions and is closest to pseudosolution \mathbf{x}_* in Euclidian metrics is accepted as the result to be found. To calculate vector \mathbf{x}_c simple linear optimization problem is solved. The hypothesis of representability of sample variances and covariances constituting the vector \mathbf{b} with the aid of variances and covariances of latent variables constituting the vector \mathbf{x}_c is verified, as before, by means of statistics

$$\chi^2 = (\mathbf{b} - \mathbf{A} \mathbf{x}_c)^T \mathbf{V}^{-1} (\mathbf{b} - \mathbf{A} \mathbf{x}_c) / s^2$$

that has χ^2 -distribution with $n-m$ degrees of freedom.

As in the traditional structural equation modelling, the considered method also allows to make conclusions on statistical significance of different model components and judge about the importance of the model components under study using goodness-of-fit tests.

To do this one should compare χ^2 statistics for two models: saturated model containing the component of interest and simplified model where this component is absent (equals to zero.) Let's denote hypothesis that the saturated model coincides with observation results as H_f . Significance level of the component of interest is revealed if there is no grounds to discard hypothesis H_f . At first one should estimate free parameters of the simplified model. The obtained value for χ^2 statistics is compared with similar characteristics for the saturated model.

Since the difference in these statistics is asymptotically distributed as \mathbf{c}^2 with the number of degrees of freedom equal to the difference in degrees of freedom of saturated and simplified models, this difference is used to verify zero hypothesis H_f , that the simplified model coincides with the observation results against alternative hypothesis H_f .

If H_f hypothesis is not discarded at the given significance level then the component under study is treated as statistically insignificant and the conclusion is made that the available data do not evidence the influence of the studied model part on the observed characteristic under consideration. If H_f hypothesis is discarded (and H_f hypothesis is accepted), then one can talk about the influence of the studied component on the given characteristic.

2.3. Alternative Factor Models for the Wavelet-Based Structural Equation Modelling

The ways of constructing new factor models for longitudinal studies instead of traditional simplex ones relying on the wavelet-based structural equation modelling include development of path coefficients factor models and variance components factor models as well as and their modifications. Typical examples of these two model variants are shown in Figures 3 and 4. Composition of wavelet coefficients to be analyzed in the capacity of observed variables depends on an application problem under consideration and may be varied. It is usually supposed that the number of time points under study equals to some power of 2.

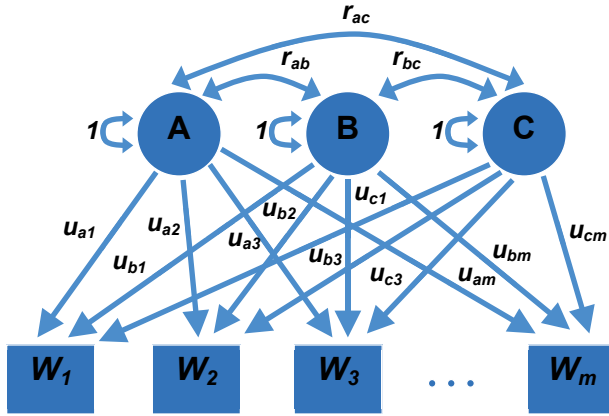


Figure 3. Path coefficients factor model represented by a path diagram

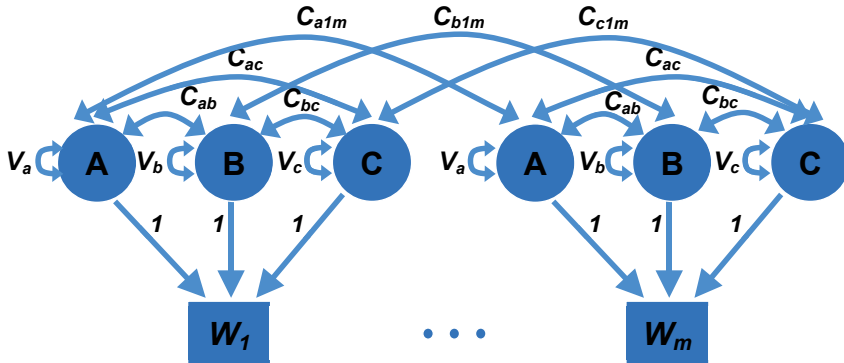


Figure 4. Variance components factor model represented by a path diagram

In case of path coefficients factor models, expressions for covariances and variances of wavelet coefficients W_i are non-linear:

$$Cov(W_i, W_j) = \sum_k \sum_l r_{kl} u_{ki} u_{lj} ;$$

$$Var(W_j) = \sum_k \sum_l r_{kl} u_{ki} u_{li} ,$$

where k and l are factor numbers, u_{**} – path coefficients, r_{**} – correlations between factors. These non-linearities make it impossible to get simple direct unambiguous estimations of free model parameters of interest. As contrasted to this, in case of variance components factor models, similar expressions are linear:

$$Cov(W_i, W_j) = \sum_k C_{kij} ;$$

$$\text{Var}(W_l) = \sum_k V_k + \sum_k \sum_l C_{kl},$$

where k and l are factor numbers, V_* – variances, C_{**} and C_{***} – covariances between factors. This fact makes it possible to obtain direct estimations of free model parameters using the alternative variant of the structural equation modelling described hereinbefore. Thus, it is the model type that may be used for solution of application problems in reality.

In practical situations, the basic variance components factor model generates a set of particular modifications representing problem peculiarities that are important for solution. For example, simultaneous analysis of different model groups can be useful for studying factor influences in case of several variants of observation conditions (see Figure 5).

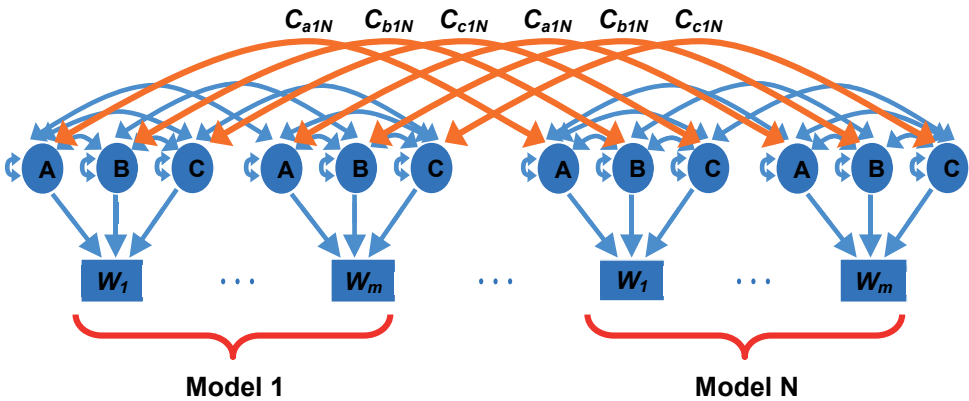


Figure 5. Studying factor influences in case of several variants of observation conditions: simultaneous analysis of model groups. C^{***} are covariances between factors

Typical representation of the wavelet-based structural equation modelling results destined for further interpretation includes:

- Factor variances and covariances estimated as free model parameters;
- Estimated correlations between different factors relevant to the same time points;
- Estimated correlations between the same factors relevant to different time points;
- Statistical significance estimations for different model components.

Corresponding examples can be found in papers [1, 20].

2.4. Model Singularity

If some model derived from an application domain yields system matrix \mathbf{A} which rank is less than the number of free model parameters, pseudosolution $\mathbf{x}_* = (\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{b}$ cannot be calculated properly because of singularity of system matrix $\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A}$. In this case, one should reduce the number of free model parameters eliminating certain dependent variables to transform the given matrix into nonsingular form. Number of eliminated variables equals to the defect of matrix $\mathbf{A}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A}$. The following technique can be used to determine redundant quantities subjected to this operation:



- Solution of the eigenvalue problem for the matrix $\mathbf{A}^T\mathbf{V}^{-1}\mathbf{A}$, which is symmetric and nonnegatively definite, to obtain the proper subspace defined by the eigenvectors corresponding to nonzero eigenvalues of the given matrix
- Rotation of the obtained proper subspace basis keeping it within this subspace to attain maximal correspondence between directions of coordinate axes of the proper subspace and ones of the initial basis that formally results in transformation of coordinates of the proper subspace axes into either substantial or negligible values³.

The axes of the initial basis, which are represented in the expressions of all the rotated basis directions by negligible coordinate values only, can be considered as lines that are approximately orthogonal with respect to the calculated nonzero proper subspace. Therefore, these lines approximately determine a subspace corresponding to the zero eigenvalues and, accordingly, define variables to be eliminated from the model to reproduce nonsingularity of the matrix in question. Since these quantities cause matrix singularity, they may be considered as dependent (redundant) ones. Their elimination turns into either expressing these variables via independent ones or assigning constant values to them and usually results in the transformed matrix nonsingularity.

If these transformations result in an obviously unacceptable model, one can keep the initial model representation and calculate an approximation of the pseudosolution using the Gauss-Seidel iteration method⁴ (as well as other relevant approaches for singular system matrices).

2.5. Examples of models for practical applications

The approach under consideration was successfully applied to solution of the following problems:

- Assessing influence of maneuvering loads occurrences and climatic conditions of basing on aircraft damage accumulation rate [1]
- Estimating the balance of flight proficiency and psychophysiological crew status influences on the variances of the oculomotor activity characteristics under study [25].

Corresponding factor models represented in the form of path diagrams are shown in Figures 6-7.

First model is destined for 8-point dynamic series realizations of parameters under study. In the aforementioned examples, they represented rates of damage accumulation and results of psychological testing, correspondingly. Only four last wavelet coefficients (of eight) were used for analysis: this detail was conditioned by the application features. Influences of national features of pilotage technique (factors **R** and **F**) and influences of national environment exploitation (factors **D** and **A**) are under investigation in the first model, whereas influences of different sorts of original phonological awareness (factors **R**, **P** and **C**) and their associated distortions conditioned by test imperfection (factors **E_R**, **E_P** and **E_C**) are

³ This standard procedure called Quartimax is usually available in the widespread statistical software packages.

⁴ This method always converges in case of the symmetric nonnegatively definite system matrices under consideration.



under investigation in the second model. The analysis that has been carried out revealed causal and temporal relationships between the latent factors in question as well as statistical significance of different model components.

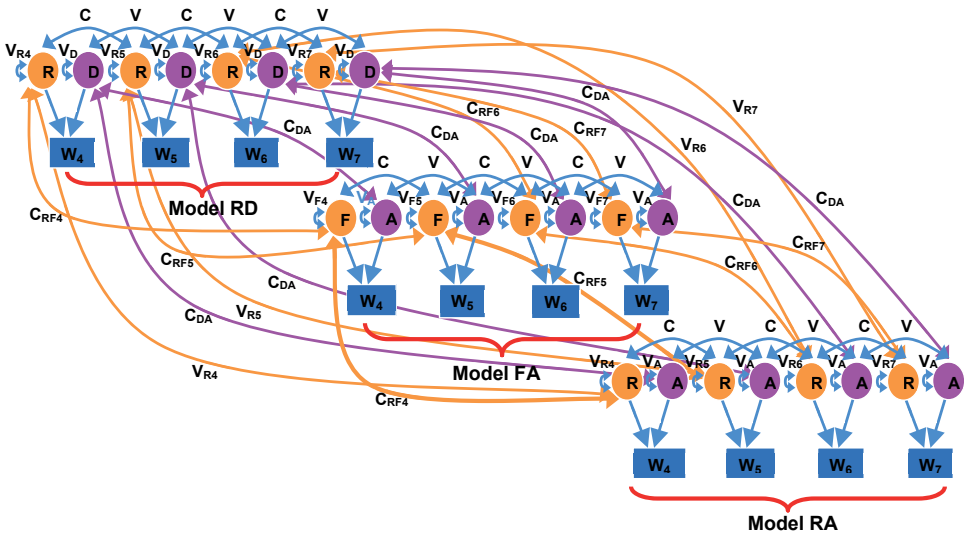


Figure 6. Model to study influence of maneuvering load occurrences and climatic conditions of basing on aircraft damage accumulation rate: influences of national features of pilotage technique are represented by factors R and F , influences of national environment exploitation – by factors D and A , V_* – variances, C_{**} and C_{***} – covariances between factors

The factor model, which is represented in Figure 7, takes into account the effects of aircraft crew proficiency, its psychophysiological condition and measurement errors on oculomotor activity. Used as observed variables are jointly the following gaze movement primary indexes estimated during experiments at the Universal Crew Cockpit Prototyping Bench (Figure 8) with the aid of an eye tracker (Figure 9) for comparable maneuvers performed by the four pilots under study: duration of gaze fixations, rate of saccades and gaze entropy. This model takes into account: effects of pilot proficiency (N_p , N_2 , N_3 and N_4) as well as combined effects of both pilot psychophysiological condition and measurement errors (S_p , S_2 , S_3 and S_4) – on the observed estimates of the given gaze movement primary indexes, which are calculated for each of the four pilots under study during the time periods of comparable maneuver implementations (P_p , P_2 , P_3 and P_4). Free model parameters to be identified are: factor loadings (n , s) and correlation coefficients ($, ,$). Values of the observed parameters were standardized using mean values and standard deviations. The factors S_p , S_2 , S_3 and S_4 are assumed to be independent of each other.

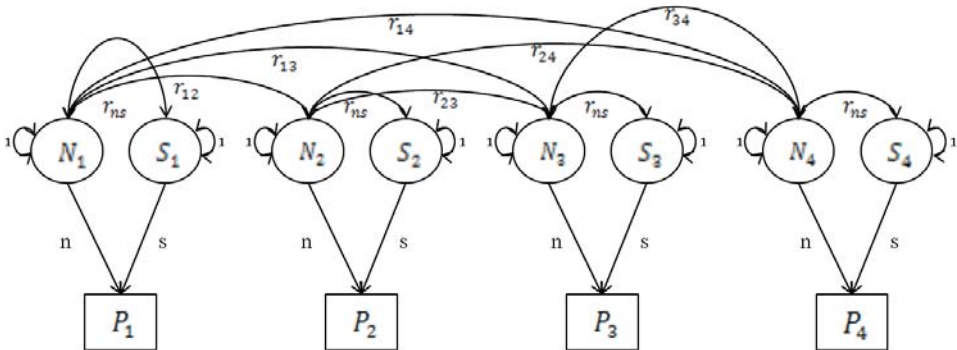


Figure 7. Factor model components: effects of pilot proficiency (N_1, N_2, N_3 and N_4) and combined effects of both pilot psychophysiological condition and measurement errors (S_1, S_2, S_3 and S_4) – on the observed estimates of the given gaze movement primary indexes, which are calculated for each of the four pilots under study during the time periods of comparable maneuver implementations (P_1, P_2, P_3 and P_4). Free model parameters to be identified are: factor loadings (n, s) and correlation coefficients (r_{ij}),



Figure 8. The Universal Crew Cockpit Prototyping Bench



Figure 9. Eye tracker to register oculomotor activity

To eliminate statistically insignificant components of the saturated model presented in Figure 7 and reveal the structure that is optimal from the viewpoint of its matching the observations, the following models were compared:

- Saturated model;
- Reduced model without correlations between corresponding factors N_i and S_i ($i=1,2,3,4$);
- Reduced model without correlations between corresponding factors N_i and S_i ($i=1,2,3,4$) and corresponding factors N_i and N_j ($i,j=1,2,3,4; i \neq j$);
- Reduced model without factors N_i ($i=1,2,3,4$).

Reduced model without factors S_i ($i=1,2,3,4$) were not under consideration since the application problem under study implies their obligatory presence.

Results of model fitting are shown in Table 1. For each model the hypothesis on its fit to observation data was tested, with statistics F being used as a goodness-of-fit measure.

Table 1.

Results of model fitting

Model	Statistics F	Degrees of freedom	p -value	Model fit. Statistical significance of model reduction
Saturated model	8.857	5	0.115	<u>Model fit.</u>
Reduced model without correlations between corresponding factors N_i and S_i ($i=1,2,3,4$) – <u>optimal model</u>	8.857	6	0.182	<u>Model fit.</u> Difference in F -statistic between the saturated model and reduced model is not statistically significant



Model	Statistics F	Degrees of freedom	p -value	Model fit. Statistical significance of model reduction
Reduced model without correlations between corresponding factors N_i and S_i ($i=1,2,3,4$) and corresponding factors N_i and N_j ($i,j=1,2,3,4; i \neq j$)	17.390	8	0.026	<u>No model fit.</u> Difference in F -statistic between the optimal model and this reduced model is statistically significant
Reduced model without factors N_i ($i=1,2,3,4$)	17.390	9	0.043	<u>No model fit.</u> Difference in F -statistic between the optimal model and this reduced model is statistically significant

Table 1 shows that both the saturated model and the reduced model without correlations between corresponding factors N_i and S_i ($i=1,2,3,4$) fit observation data ($p > 0.05$). At the same time, the hypothesis on model fit should be rejected for the reduced model without correlations between corresponding factors N_i and S_i ($i=1,2,3,4$) and corresponding factors N_i and N_j ($i,j=1,2,3,4; i \neq j$) as well as for the reduced model without factors N_i ($i=1,2,3,4$) ($p < 0.05$).

Difference in F -statistic for the saturated and reduced models is asymptotically distributed as χ^2 , with number of degrees of freedom being equal to the difference in their numbers of degrees of freedom. Thus, the reduced model without correlations between corresponding factors N_i and S_i ($i=1,2,3,4$) should be recognized as *optimal* one since there are no significant changes in the given statistic.

In case of the models for which the hypothesis on fit is rejected, the corresponding differences in F -statistic are statistically significant. Therefore, the indicated changes in factors and correlations degrade the model fit.

Since correlations between corresponding factors N_i and S_i ($i=1,2,3,4$) equal zero, the variances of observed variables consist of two components () representing, respectively, the factor of pilot proficiency and the combined factor of both pilot psychophysiological condition and measurement errors. The n and s values identified for the optimal model allow to conclude that the variance representing variability of the observed parameters is conditioned by 38% influence of pilot proficiency and 62% combined influence of both psychophysiological condition of pilots and measurement errors. This fact suggests the comparable influences of the factors under study on the analyzed characteristics.



3. THE EMPIRICAL APPROACH BASED ON WAVELET TRANSFORMS AND MULTIVARIATE STATISTICAL TECHNIQUES

Algorithmic aspects of this approach are represented by the following steps. It is assumed that the operator's activity is represented by a set of time series describing the dynamics of technical system parameters as well as operator's state, if possible.

Step 1. Preliminary processing: selection of time intervals for exercise comparison and data normalization. Selected are time series subsets corresponding to common time intervals, which are suitable for comparison of the same type exercises to be analyzed. Prior to the following computations, time series representing the history of performance of exercise completion are brought to a single scale, where the maximum is one and the minimum is zero.

Step 2. Elimination of redundant information. Where the data are broken down by sub exercises or represented by several measured parameters, the redundant information contained in the given time series is removed using *the Principal Components Analysis* [40, 45]. To do so, matrices of mutual correlations of time series values are computed, the algebraic problem of eigenvalues is solved and it is figured out to what extent it is possible to decrease the dimension of eigen subspace of the researched parameters so that this would contain a sufficiently representative (in practice, from 70% or higher) part of variability of the observed parameters. For each of the selected eigendirections of this subspace (principal components), for one of the highest component loads *a representative is elected from sub exercises or registered parameters (transition to the basis of principal components is impractical due to uncertain substantial interpretation of principal components and, in a number of applied tasks, due to no precise synchronization of researched processes for different exercises in time)*. The purpose of this stage is to leave only relatively independent characteristics replacing groups of significantly dependent representatives with only one characteristic parameter to avoid distortions stipulating to combined effect of strongly dependent characteristics in the subsequent phases.

Step 3. Transition to integral characteristics for time intervals by means of discrete wavelet transform. Time series representing the training processes under study are replaced with series of wavelet coefficients obtained as a result of *the Multiresolution Analysis* [39]. In this case, the original processes as functions of time are replaced with the integral characteristics of the time intervals, which are associated with these functions domain. In addition, significant saving (for about an order of magnitude) in the number of coefficients necessary for a correct representation of these process becomes available. *Due to the rules for assigning wavelet coefficients to time series fragments, which are in use in multiresolution analysis, problems associated with the need to precisely synchronize processes relating to various same-type training exercises in time have been cancelled since the most significant coefficients relating to relatively long time intervals are almost insensitive to moderate time shifts.* Length of the wavelet representations used during subsequent



analysis stages can be significantly (approximately an order of magnitude) smaller than the length of the corresponding original time series, with no loss in the estimations accuracy.

Step 4. Computing mutual distance matrices. For each researched sub exercise or parameter one needs to compute the matrix of mutual distances between wavelet representations of source processes for different operator exercises, which are obtained in stage 3. Dimensions of such matrices are equal to the volume of the sample of analyzed exercises. Such matrices of mutual distances for all considered sub exercises are added forming the total matrix of mutual distances between the exercises under study.

Step 5. Multidimensional scaling to analyze the mutual allocation of operator exercises within a space with acceptable dimensions. The computed allocation of exercises under study in the resulting space of *the Multidimensional Scaling* [5, 42] is further used to define distances between the exercises to make diagnostic decisions. *The dimensions of the scaling space are defined based on the condition of sufficient differentiation of exercise samples relating to different recognizable classes.*

Step 6. Cluster analysis of patters in the obtained scaling space to reveal clusters representing various types of exercises and operator skill classes. Steps 5 and 6 are necessary to reasonably select clusters of abnormal exercises.

Step 7. Using the identification procedure, creation of probabilistic models represented by Markov random processes with discrete states and continuous time [6, 19, 21-27, 38] for each pattern cluster to represent probabilistic dynamics for each operator skill class to forecast probabilistic class behavior in two ways: by distribution of probabilities of being in model states and dynamics of mathematical expectations for each independent parameter determined in Step 2 (parameters are considered approximately as independent ones since they are calculated with the aid of the Principal Component Analysis).

Step 8. Computing distances to pattern cluster centers or to the pattern nearest to the operator based on results of completion of a sequence of test exercises. Where the volume of pattern samples is fairly large, distances are defined to centers of cluster patterns. These are computed based on multidimensional scaling data obtained at Step 5. Where pattern samples are small, the nearest pattern is defined, which definition may be done in two ways: either immediately through the computing of the pattern being nearest in the Euclidian metric of wavelet representation or through the identifying of the pattern in the resulting space of multidimensional scaling, such pattern being nearest in the Euclidian metric.

Step 9. Probabilistic assessments of operator skill class recognition using sample distribution functions of distances to cluster centers. Probabilistic assessments of recognition are defined using sample distribution functions of Euclidean distances to cluster centers of patterns belonging to the relevant recognizable operator skill class $i \in \{0, \dots, z\}$ in a multidimensional scaling space. Computed values of d_i , where d_i is the Euclidean distance of i^{th} cluster in the space of multidimensional scaling, are interpreted as probabilistic assessments of belonging to the given classes. Their distribution among classes characterizes the reliability of the obtained classification. In fact, *the given approach implements the idea of the linear discriminant analysis in an generalized form.* But unlike the latter there are no restrictions on observed data distributions.



Step 10. Probabilistic assessments of operator skill class attribution using Bayesian likelihood estimations. These estimations are calculated basing on identified probabilistic models.

Step 11. Forecasting behavior of the parameters selected at Step 2 for the operator skill class cluster recognized at Steps 9 and 10 with the aid of probabilistic models created at Step 7 by both distribution of probabilities of being in model states and dynamics of mathematical expectations for each independent parameter to estimate probability of hitting into dangerous situations associated with the certain intervals of the parameters under consideration.

The techniques, which implementation results are presented below, have been developed by the authors of this paper and presented in works [29-32]. The *Intelligent System for Flight Analysis (ISFA)* implementing the developed approach with the aid of the LabVIEW graphical programming environment provided the required calculations. ISFA has been officially registered at the Russian Patent Agency (“ROSPATENT”) [28].

Partial comparisons to estimate parameter’s contributions to the mutual distances are available in case of small exercise sample sizes. In case of greater sample sizes, plural comparisons to get Bayesian likelihood estimations for operator skill clusters attribution, which contain parameter’s contributions, are available.

The actions, which an expert is responsible for, are:

- Assessment to select clusters of abnormal exercises;
- Analysis of parameter’s balance to select relevant parameters to be under study;
- Identification and interpretation of abnormalities and mistakes.

4. PRINCIPAL RESULTS AND CONCLUSIONS

1. The wavelet-based structural equation modelling, which combines capabilities of wavelet transforms and trained factor structures, can be used to reveal the influence of human factor on the activity of operators of complex technical systems. According to the proposed approach, the samples of coefficients resulted from discrete wavelet transform of initial parameter time series under study and responsible for different observation periods are considered as values of observed variables in the subsequent structural equation modelling to reveal time history of factor influences and estimates of factor interaction.
2. Identification of free factor model parameters (usually factor variances and covariances) can be carried out by a direct (noniterative) procedure based on the maximum likelihood method that is an alternative to traditional ambiguous local iterative solutions of multivariate optimization problems, which depend on the initial approximations. Main features of this procedure are:
 - Composing overdetermined sets of equations as respects free factor model parameters and their following solution by the maximum likelihood method;
 - Using variance components path model;
 - Using new criterion instead of traditional significance level for testing model representability of observation results, viz.: the critical percentage of mean-square devia-



tion values of residual vector components for the corresponding observed variances and covariances;

- Possibility of significance tests for model components using statistical goodness-of-fit measures.
3. With the operator's activity being represented by a set of time series describing the dynamics of technical system parameters as well as operator's state, if possible, the empirical approach which is based on wavelet transforms and multivariate statistical techniques, makes it possible to:
 - Support the outcome grading for current exercises by means of comparing their parameters with the exercise patterns collected beforehand in the activity record database;
 - Carry out quantitative and qualitative assessments of operator skill class, which are based on comparisons of current exercises with the activity database patterns in the wavelet representation metric associated with observed parameters (basic technique) as well as on probabilistic assessments of skill class recognition using sample distribution functions of exercise distances to cluster centers in a scaling space (supportive technique) and Bayesian likelihood estimations with the aid of probabilistic profile of staying in activity parameter ranges (also supportive technique).
 4. The multidimensional scaling and cluster analysis of patterns in an obtained scaling space can be used to reasonably select abnormal exercises. The techniques in use provide both discrimination in a scaling space between the trial types and correct skill assessments.
 5. The techniques in use provide possibility for creating certain classification rules to separate different scale levels of trial quality assessment in a scaling space. Wherein cluster differences for an exercise type can be explained by the exercise implementation resulted from individual skills.
 6. The pattern selection technique in use makes it possible to ensure assessments of acceptable correctness.
 7. Both the technique for probabilistic recognition of skill classes via Bayesian likelihood estimations (when a skill class is selected with the aid of probabilistic profile of staying in flight parameter ranges) and the technique of calculating parameter's contributions to the mutual distances in the wavelet coefficient metric in pairwise exercises comparison, have demonstrated the capabilities of:
 - Recognizing sets of abnormal exercises in the scaling spaces with the wavelet coefficient metric,
 - Detection of parameters characterizing operator mistakes to reveal the causes of abnormality.
 8. The given empirical approach can be applied even if the exercise sample sizes are small since both the pattern selection and calculation of the parameter's contributions to the mutual distances in the wavelet coefficient metric in pairwise exercises comparison are available in this case.
 9. The factor analysis shows comparable influences of the factor of pilot proficiency and the combined factor of both pilot psychophysiological condition and measurement errors on the analyzed primary indexes of oculomotor activity.



Acknowledgement

This work was performed as a part of the “SAFEMODE” Project (Grant Agreement No 814961) with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project UID RFMEFI62819X0014).

References

1. Baranov S.N., Kuravsky L.S., Baranov N.I. Studying influence of maneuvering loads occurrences and climatic conditions of basing on aircraft damage accumulation rate with the aid of trained structures. In: Proc. 5th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies, Edinburgh, Scotland, United Kingdom, July 2008.
2. Bastani V., Marcenaro L., Regazzoni C. Unsupervised trajectory pattern classification using hierarchical Dirichlet Process Mixture hidden Markov model. 2014 IEEE International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP) / IEEE. 2014. Pp. 1–6.
3. Bishop Y.M.M., Fienberg S.E., Holland P.W. Discrete multivariate analysis: Theory and practice. (Cambridge, MA, M I T Press, 1975.)
4. Bollen K.A. Structural equations with latent variables. (New York, John Wiley, 1989.)
5. Borg, I., Groenen, P. J. F. Modern Multidimensional Scaling Theory and Applications. – Springer, 2005. – P.140.
6. Cramer H. Mathematical Methods of Statistics. Princeton: Princeton University Press. 1999. – 575 pp.
7. Eerland W.J., Box S. Trajectory Clustering, Modelling and Selection with the focus on Airspace Protection. AIAA Infotech@ Aerospace. _ AIAA, 2016. Pp. 1–14.
8. Enriquez M. Identifying temporally persistent flows in the terminal airspace via spectral clustering. Tenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2013). Federal Aviation Administration (FAA) and EUROCONTROL. Chicago, IL, USA: 2013. June 10-13.
9. Enriquez M., Kurcz C. A Simple and Robust Flow Detection Algorithm Based on Spectral Clustering. International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT). Federal Aviation Administration (FAA) and EUROCONTROL. – Berkeley, CA, USA: 2012. May 22-25.
10. Gaffney S., Smyth P. Joint probabilistic curve clustering and alignment. In Advances in Neural Information Processing Systems. Vol. 17. Cambridge, MA: MIT Press, 2005. Pp. 473–480.
11. Gaffney S., Smyth P. Trajectory clustering with mixtures of regression models. Proceedings of the fifth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. 1999. Pp. 63–72.
12. Gariel M., Srivastava A., Feron E. Trajectory clustering and an application to airspace monitoring. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2011. Vol. 12, no. 4. Pp. 1511–1524.
13. Goldstein H. Multilevel statistical models. (3rd ed., London, Arnold, 2003.)
14. Grevtsov N. Synthesis of control algorithms for aircraft trajectories in time optimal climb and descent. Journal of Computer and Systems Sciences International. 2008. Vol. 47, no. 1. Pp. 129–138.
15. Hung C., Peng W., Lee W. Clustering and aggregating clues of trajectories for mining trajectory patterns and routes. The VLDB Journal – The International Journal on Very Large Data Bases. 2015. Vol. 24, no. 2. Pp. 169–192.
16. Jöreskog K.G. Estimation and testing of simplex models. British Journal of Mathematical and Statistical Psychology, Vol. 23, pp.121-145, 1970.
17. Krasilshchikov M.N., Evdokimenkov V.N., Bazlev D.A. Individually adapted airborne systems for monitoring the aircraft technical condition and supporting the pilot control actions. – Moscow, MAI Publishing House, 2011. – 440 pp (in Russian).
18. Kuchar J. K., Yang L. C. A review of conflict detection and resolution modeling methods. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2000. Vol. 1, no. 4. Pp. 179–189.
19. Kuravsky L.S., Artemenkov S.L., Yuriev G.A., Grigorenko E.L. New approach to computer-based



- adaptive testing. – *Experimental Psychology*. 2017. Vol. 10. No. 3. Pp. 33–45. doi:10.17759/expsy.2017100303.
20. Kuravsky L.S., Baranov S.N. Development of the wavelet-based confirmatory factor analysis for monitoring of system factors. – In: Proc. 5th International Conference on Condition Monitoring & Machinery Failure Prevention Technologies, Edinburgh, United Kingdom, July 2008, pp.818-834.
 21. Kuravsky L.S., Margolis A.A., Marmalyuk P.A., Panfilova A.S. , Yuriev G.A. Mathematical aspects of the adaptive simulator concept – *Psychological Science and Education*. 2016. Vol. 21. No. 2. Pp. 84–95. doi: 10.17759/pse.2016210210 (in Russian).
 22. Kuravsky L.S., Margolis A.A., Marmalyuk P.A., Panfilova A.S., Yuryev G.A., Dumin P.N. A Probabilistic Model of Adaptive Training. – *Applied Mathematical Sciences*, Vol. 10, 2016, no. 48, 2369 – 2380, <http://dx.doi.org/10.12988/ams.2016.65168>.
 23. Kuravsky L.S., Marmalyuk P.A., Yurev G.A. Diagnostics of Professional Skills Based on Probability Distributions of Oculomotor Activity. – *RFBR Journal*, No. 3 (91), 2016, pp.72-82 (Supplement to “Information Bulletin of RFBR” No. 24, in Russian).
 24. Kuravsky L.S., Marmalyuk P.A., Yuryev G.A. and Dumin P.N. A Numerical Technique for the Identification of Discrete-State Continuous-Time Markov Models – *Applied Mathematical Sciences*. Vol. 9, 2015, No. 8, pp. 379–391. URL: <http://dx.doi.org/10.12988/ams.2015.410882>.
 25. Kuravsky L.S., Marmalyuk P.A., Yuryev G.A., Belyaeva O.B. and Prokopieva O.Yu. Mathematical Foundations of Flight Crew Diagnostics Based on Videoculography Data. – *Applied Mathematical Sciences*, Vol. 10, 2016, no. 30, 1449–1466, <http://dx.doi.org/10.12988/ams.2016.6122>.
 26. Kuravsky L.S., Marmalyuk P.A., Yuryev G.A., Dumin P.N., Panfilova A.S. Probabilistic modeling of CM operator activity on the base of the Rasch model. – In: Proc. 12th International Conference on Condition Monitoring & Machinery Failure Prevention Technologies, Oxford, UK, June 2015.
 27. Kuravsky L.S., Yuriev G.A. Probabilistic method of filtering artefacts in adaptive testing. – *Experimental Psychology*, Vol.5, No. 1, 2012, pp. 119-131 (in Russian).
 28. Kuravsky L.S., Yuryev G.A. Certificate of state registration of the computer program №2018660358 Intelligent System for Flight Analysis v1.0 (ISFA#1.0). – Application №2018617617; declared 18 July 2018; registered 22 August 2018. – (ROSPATENT).
 29. Kuravsky L.S., Yuryev G.A. Detecting abnormal activities of operators of complex technical systems and their causes basing on wavelet representations. – *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 10(2), 2019, pp. 724–742. <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&IType=2>.
 30. Kuravsky L.S., Yuryev G.A. On the approaches to assessing the skills of operators of complex technical systems. – In: Proc. 15th International Conference on Condition Monitoring & Machinery Failure Prevention Technologies, Nottingham, UK, September 2018. – 25 pp.
 31. Kuravsky L.S., Yuriev G.A., Dumin P.N.. Estimating the influence of human factor on the activity of operators of complex technical systems in civil engineering with the aid of adaptive diagnostics, *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 10(2), 2019, pp. 1930-1941. <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&IType=02>.
 32. Kuravsky L.S., Yuryev G.A., Zlatomrezhev V.I. New approaches for assessing the activities of operators of complex technical systems. *Ekspierimental'naya psikhologiya = Experimental psychology (Russia)*, 2019, vol. 12, no. 4, pp. 27–49. doi:10.17759/expsy.2019120403.
 33. Lawley D.N., Maxwell A.E. Factor analysis as a statistical method. (London, Butterworths, 1971, 2nd ed., 153 pp).
 34. Laxhammar R., Falkman G. Online learning and sequential anomaly detection in trajectories. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2014. Vol. 36, no. 6. Pp. 1158–1173.



35. Li Z., et al. Incremental clustering for trajectories. Database Systems for Advanced Applications. Lecture Notes in Computer Science. 2010. Vol. 5982. Pp. 32–46.
36. Liu H., Li J. Unsupervised multi-target trajectory detection, learning and analysis in complicated environments. 2012 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR) / IEEE. 2012. Pp. 3716–3720.
37. Loehlin J.C. Latent variable models: An introduction to factor, path, and structural analysis. (Hillsdale, NJ, Erlbaum, 1987.)
38. Markov models in the diagnostics and prediction problems: Textbook. /Edited by L.S. Kuravsky. – 2nd Edition, Enlarged. – Moscow: MSUPE Edition, 2017. – 203 pp. (in Russian).
39. Neal P.G. Multiresolution Analysis for Adaptive Refinement of Multiphase Flow Computations. – University of Iowa, 2010. –116 pp.
40. René Vidal, Yi Ma, Shankar Sastry. Generalized Principal Component Analysis. – Springer-Verlag: New York, 2016. URL: <http://www.springer.com/us/book/9780387878102>
41. Rintoul M., Wilson A. Trajectory analysis via a geometric feature space approach. Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal. 2015.
42. Trevor F. Cox, M.A.A. Cox. Multidimensional Scaling, Second Edition. – Chapman & Hall/CRC, 2001. – P. 299.
43. Wei J., et al. Design and Evaluation of a Dynamic Sectorization Algorithm for Terminal Airspace. Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2014. Vol. 37, no. 5. Pp. 1539–1555.
44. Wilson A., Rintoul M., Valicka C. Exploratory Trajectory Clustering with Distance Geometry. International Conference on Augmented Cognition. – Springer. 2016. Pp. 263–274.
45. Xiangyu Kong, Changhua Hu, Zhansheng Duan. Principal Component Analysis Networks and Algorithms. – Springer, 2017. URL: <http://www.springer.com/us/book/9789811029134>.



Оценка вклада человеческого фактора в эксплуатационные характеристики сложных технических систем

Куравский Л.С.*

МГППУ, Москва, Россия,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3375-8446>,
e-mail: l.s.kuravsky@gmail.com

Юрьев Г.А.**

МГППУ, Москва, Россия,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2960-6562>,
e-mail: g.a.yuryev@gmail.com

Златомрежнев В.И.***

ГосНИИАС, Москва, Россия,
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1776-6881>
e-mail: vizlatomr@2100.gosniias.ru

Юрьева Н.Е.****

МГППУ, Москва, Россия,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1419-876X>,
e-mail: yurieva.ne@gmail.com

Михайлов А.Ю.*****

ГосНИИАС, Москва, Россия,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0278-1819>
e-mail: aymihaylov@2100.gosniias.ru

Для цитаты:

Куравский Л.С., Юрьев Г.А., Златомрежнев В.И., Юрьева Н.Е., Михайлов А.Ю. Оценка вклада человеческого фактора в эксплуатационные характеристики сложных технических систем // Моделирование и анализ данных. 2020. Том 10. № 1. С. 7–34. DOI: 10.17759/mda.2020100101 (In Engl., abstr. In Russ.)

***Куравский Лев Семёнович**, доктор технических наук, профессор, декан факультета информационных технологий, Московский государственный психолого-педагогический университет, Москва, Россия, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3375-8446>, e-mail: l.s.kuravsky@gmail.com

****Юрьев Григорий Александрович**, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий научной лабораторией, Московский государственный психолого-педагогический университет, Москва, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2960-6562>, e-mail: g.a.yuryev@gmail.com

*****Златомрежнев Валентин Игоревич**, Заведующий лабораторией, Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (ГосНИИАС), Москва, Россия, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1776-6881>, E-mail: vizlatomr@2100.gosniias.ru

******Юрьева Наталья Евгеньевна**, кандидат технических наук, научный сотрудник, Московский государственный психолого-педагогический университет, Москва, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1419-876X>, e-mail: yurieva.ne@gmail.com



Оценка влияния человеческого фактора на деятельность операторов сложных технических систем является важной задачей для мониторинга состояния, подготовки и диагностики персонала. Представлены обзор и взаимные сравнения подходов, которые используются для оценки влияния человеческого фактора и уже показали свою эффективность в практическом применении. Рассматриваются: моделирование структурными уравнениями (конфирматорный факторный анализ), байесовские оценки вероятностных моделей, представленные марковскими случайными процессами, многомерные статистические методы, включающие дискриминантный и кластерный анализ, а также вейвлет-преобразования.

Ключевые слова: Операторы сложных технических систем, человеческий фактор, мониторинг состояния, факторный анализ, конфирматорный факторный анализ, марковские случайные процессы, вейвлет-преобразование, многомерные статистические методы, анализ главных компонент, многомерное шкалирование, кластерный анализ.

*******Михайлов Артём Юрьевич**, инженер 1 кат, Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (ГосНИИАС), Москва, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0278-1819>, E-mail: aymihaylov@2100.gosniias.ru

Благодарность

Работа выполнена как часть проекта «SAFEMODE» (грант № 814961) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект UID RFMEFI62819X0014).

Литература

1. Baranov S.N., Kuravsky L.S., Baranov N.I. Studying influence of maneuvering loads occurrences and climatic conditions of basing on aircraft damage accumulation rate with the aid of trained structures. In: Proc. 5th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies, Edinburgh, Scotland, United Kingdom, July 2008.
2. Bastani V., Marcenaro L., Regazzoni C. Unsupervised trajectory pattern classification using hierarchical Dirichlet Process Mixture hidden Markov model//2014 IEEE International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP)/IEEE. 2014. Pp. 1–6.
3. Bishop Y.M.M., Fienberg S.E., Holland P.W. Discrete multivariate analysis: Theory and practice. (Cambridge, MA, M I T Press, 1975.)
4. Bollen K.A. Structural equations with latent variables. (New York, John Wiley, 1989.)
5. Borg, I., Groenen, P. J. F. Modern Multidimensional Scaling Theory and Applications. – Springer, 2005. – P.140.
6. Cramer H. Mathematical Methods of Statistics. Princeton: Princeton University Press. 1999. – 575 pp.
7. Eerland W.J., Box S. Trajectory Clustering, Modelling and Selection with the focus on Airspace Protection //AIAA Infotech@ Aerospace. _ AIAA, 2016. Pp. 1–14.
8. Enriquez M. Identifying temporally persistent flows in the terminal airspace via spectral clustering // Tenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2013)/Federal Aviation Administration (FAA) and EUROCONTROL. Chicago, IL, USA: 2013. June 10–13.
9. Enriquez M., Kurcz C. A Simple and Robust Flow Detection Algorithm Based on Spectral Clustering // International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT)/Federal Aviation Administration (FAA) and EUROCONTROL. – Berkeley, CA, USA: 2012. May 22–25.



10. Gaffney S., Smyth P. Joint probabilistic curve clustering and alignment//In *Advances in Neural Information Processing Systems*. Vol. 17. Cambridge, MA: MIT Press, 2005. Pp. 473–480.
11. Gaffney S., Smyth P. Trajectory clustering with mixtures of regression models//*Proceedings of the fifth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*. 1999. Pp. 63–72.
12. Gariel M., Srivastava A., Feron E. Trajectory clustering and an application to airspace monitoring// *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2011. Vol. 12, no. 4. Pp. 1511–1524.
13. Goldstein H. *Multilevel statistical models*. (3rd ed., London, Arnold, 2003.)
14. Grevtsov N. Synthesis of control algorithms for aircraft trajectories in time optimal climb and descent // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2008. Vol. 47, no. 1. Pp. 129–138.
15. Hung C., Peng W., Lee W. Clustering and aggregating clues of trajectories for mining trajectory patterns and routes//*The VLDB Journal – The International Journal on Very Large Data Bases*. 2015. Vol. 24, no. 2. Pp. 169–192.
16. Jöreskog K.G. Estimation and testing of simplex models. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, Vol. 23, pp.121–145, 1970.
17. Krasilshchikov M.N., Evdokimenkov V.N., Bazlev D.A. Individually adapted airborne systems for monitoring the aircraft technical condition and supporting the pilot control actions. – Moscow, MAI Publishing House, 2011. – 440 pp. (in Russian).
18. Kuchar J. K., Yang L. C. A review of conflict detection and resolution modeling methods//*IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2000. Vol. 1, no. 4. Pp. 179–189.
19. Kuravsky L.S., Artemenkov S.L., Yuriev G.A., Grigorenko E.L. New approach to computer-based adaptive testing. – *Experimental Psychology*. 2017. Vol. 10. No. 3. Pp. 33–45. doi:10.17759/expsy.2017100303.
20. Kuravsky L.S., Baranov S.N. Development of the wavelet-based confirmatory factor analysis for monitoring of system factors. – In: *Proc. 5th International Conference on Condition Monitoring & Machinery Failure Prevention Technologies*, Edinburgh, United Kingdom, July 2008, pp. 818–834.
21. Kuravsky L.S., Margolis A.A., Marmalyuk P.A., Panfilova A.S., Yuriev G.A. Mathematical aspects of the adaptive simulator concept – *Psychological Science and Education*. 2016. Vol. 21. No. 2. Pp. 84–95. Doi: 10.17759/pse.2016210210 (in Russian).
22. Kuravsky L.S., Margolis A.A., Marmalyuk P.A., Panfilova A.S., Yuryev G.A., Dumin P.N. A Probabilistic Model of Adaptive Training. – *Applied Mathematical Sciences*, Vol. 10, 2016, no. 48, 2369–2380, <http://dx.doi.org/10.12988/ams.2016.65168>.
23. Kuravsky L.S., Marmalyuk P.A., Yurev G.A. Diagnostics of Professional Skills Based on Probability Distributions of Oculomotor Activity. – *RFBR Journal*, No. 3 (91), 2016, pp. 72–82 (Supplement to “Information Bulletin of RFBR” No. 24, in Russian).
24. Kuravsky L.S., Marmalyuk P.A., Yuryev G.A. and Dumin P.N. A Numerical Technique for the Identification of Discrete-State Continuous-Time Markov Models – *Applied Mathematical Sciences*. Vol. 9, 2015, No. 8, pp. 379–391. URL: <http://dx.doi.org/10.12988/ams.2015.410882>.
25. Kuravsky L.S., Marmalyuk P.A., Yuryev G.A., Belyaeva O.B. and Prokopieva O.Yu. Mathematical Foundations of Flight Crew Diagnostics Based on Videoculography Data. – *Applied Mathematical Sciences*, Vol. 10, 2016, no. 30, 1449–1466, <http://dx.doi.org/10.12988/ams.2016.6122>.
26. Kuravsky L.S., Marmalyuk P.A., Yuryev G.A., Dumin P.N., Panfilova A.S. Probabilistic modeling of CM operator activity on the base of the Rasch model. – In: *Proc. 12th International Conference on Condition Monitoring & Machinery Failure Prevention Technologies*, Oxford, UK, June 2015.
27. Kuravsky L.S., Yuriev G.A. Probabilistic method of filtering artefacts in adaptive testing. – *Experimental Psychology*, Vol.5, No. 1, 2012, pp. 119–131 (in Russian).
28. Kuravsky L.S., Yuryev G.A. Certificate of state registration of the computer program №2018660358 *Intelligent System for Flight Analysis v1.0 (ISFA#1.0)*. – Application №2018617617; declared 18 July 2018; registered 22 August 2018. – (ROSPATENT).



29. Kuravsky L.S., Yuryev G.A. Detecting abnormal activities of operators of complex technical systems and their causes basing on wavelet representations. – International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). 10(2), 2019, pp. 724–742. <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&IType=2>.
30. Kuravsky L.S., Yuryev G.A. On the approaches to assessing the skills of operators of complex technical systems. – In: Proc. 15th International Conference on Condition Monitoring & Machinery Failure Prevention Technologies, Nottingham, UK, September 2018. – 25 pp.
31. Kuravsky L.S., Yuriev G.A., Dumin P.N., Estimating the influence of human factor on the activity of operators of complex technical systems in civil engineering with the aid of adaptive diagnostics, International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). 10(2), 2019, pp. 1930–1941. <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&IType=02>.
32. Kuravsky L.S., Yuryev G.A., Zlatomrezhev V.I. New approaches for assessing the activities of operators of complex technical systems. Eksperimental'naya psikhologiya = Experimental psychology (Russia), 2019, vol. 12, no. 4, pp. 27–49. doi:10.17759/exppsy.2019120403.
33. Lawley D.N., Maxwell A.E. Factor analysis as a statistical method. (London, Butterworths, 1971, 2nd ed., 153 pp).
34. Laxhammar R., Falkman G. Online learning and sequential anomaly detection in trajectories // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2014. Vol. 36, no. 6. Pp. 1158–1173.
35. Li Z., et al. Incremental clustering for trajectories // Database Systems for Advanced Applications. Lecture Notes in Computer Science. 2010. Vol. 5982. Pp. 32–46.
36. Liu H., Li J. Unsupervised multi-target trajectory detection, learning and analysis in complicated environments // 2012 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR)/IEEE. 2012. Pp. 3716–3720.
37. Loehlin J.C. Latent variable models: An introduction to factor, path, and structural analysis. (Hillsdale, NJ, Erlbaum, 1987.)
38. Markov models in the diagnostics and prediction problems: Textbook./Edited by L.S. Kuravsky. – 2nd Edition, Enlarged. – Moscow: MSUPE Edition, 2017. – 203 pp. (in Russian).
39. Neal P.G. Multiresolution Analysis for Adaptive Refinement of Multiphase Flow Computations. – University of Iowa, 2010. – 116 pp.
40. René Vidal, Yi Ma, Shankar Sastry. Generalized Principal Component Analysis. – Springer-Verlag: New York, 2016. URL: <http://www.springer.com/us/book/9780387878102>
41. Rintoul M., Wilson A. Trajectory analysis via a geometric feature space approach // Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal. 2015.
42. Trevor F. Cox, M.A.A. Cox. Multidimensional Scaling, Second Edition. – Chapman & Hall/CRC, 2001. – P. 299.
43. Wei J., et al. Design and Evaluation of a Dynamic Sectorization Algorithm for Terminal Airspace // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2014. Vol. 37, no. 5. Pp. 1539–1555.
44. Wilson A., Rintoul M., Valicka C. Exploratory Trajectory Clustering with Distance Geometry // International Conference on Augmented Cognition/Springer. 2016. Pp. 263–274.
45. Xiangyu Kong, Changhua Hu, Zhansheng Duan. Principal Component Analysis Networks and Algorithms. – Springer, 2017. URL: <http://www.springer.com/us/book/9789811029134>.



УДК 159.938.3, 159.9.07

Similar or Different? An Item Response Theory Analysis of the Synonyms Test in Adults with and without a History of Institutionalization

Logvinenko T.I.*

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7430-1963>,
e-mail: logvinenkota.spb@gmail.com

Talantseva O.I.**

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7555-1216>,
e-mail: talantcevaoksana@gmail.com

Volokhova E.M.***

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1711-0447>,
e-mail: human.nerpa@gmail.com

Khalaf S.****

University of Houston, Houston, United States,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8809-590X>,
e-mail: shiva.khalaf@times.uh.edu

Grigorenko E.L.*****

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia;
University of Houston, Houston, United States,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9646-4181>,
e-mail: elena.grigorenko@times.uh.edu

For citation:

Logvinenko T.I., Talantseva O.I., Volokhova E.M., Khalaf S., Grigorenko E.L. Similar or different? An Item Response Theory Analysis of the Synonyms Test in Adults with and without a History of Institutionalization. *Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis*, 2020. Vol. 10, no. 1, pp. 35–63. DOI: 10.17759/mda.2020100102

***Logvinenko Tatiana Igorevna**, Researcher, Laboratory of the Translational Sciences of Human Development, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7430-1963>, e-mail: logvinenkota.spb@gmail.com

****Talantseva Oksana Igorevna**, Researcher, Laboratory of the Translational Sciences of Human Development, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7555-1216>, e-mail: talantcevaoksana@gmail.com



The lack of valid and standardized instruments, directed on an assessment of the language domain in adolescents and adults in Russia postulates the urgent necessity of their development. To fill this gap, the language battery, ARFA-RUS, was created and applied in a large project investigating the long-term consequences of rearing in institutional care settings on human development. In the current study, an Item Response Theory (IRT) approach was used to examine the psychometric properties of the Synonyms Subtest of ARFA-RUS as the first step of validation of the battery. IRT results demonstrated the test is reliable for the low-to-moderate levels of the assessed ability; yet, to capture a wider ability range, more difficult items are needed. The ARFA-RUS Synonyms Subtest was less suitable for the post-institutionalized group of adults; in this group, the latent ability estimate explained a lower percentage of variance in comparison to adults raised in biological families. With regard to item-specific analyses, two items demonstrated paradoxical patterns with decreased probability of correct response at increased ability. In addition, one item was eliminated from the final version of the Synonyms Subtest due to its poor item fit and low discrimination value.

Keywords: Item-response theory, psychometrics, differential item functioning, language, synonyms, assessment.

Funding: The reported study was supported by the Government of the Russian Federation (grant № 14.Z50.31.0027 “Early deprivation influences biological and behavioral indicators of development”; E.L.G., Principal Investigator). We are grateful to Mei Tan for her editorial support.

****Volokhova Ekaterina Mikhailovna*, Researcher, Laboratory of the Translational Sciences of Human Development, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1711-0447>, e-mail: human.nerpa@gmail.com

*****Khalaf Shiva, PhD*, post-doctoral fellow at the Texas Institute for Measurement, Evaluation, and Statistics, University of Houston, Houston, United States, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8809-590X>, e-mail: shiva.khalaf@times.uh.edu

******Grigorenko Elena Leonidovna*, PhD, professor, principal investigator, Laboratory of the Translational Sciences of Human Development, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia; University of Houston, Houston, United States, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9646-4181>, e-mail: elena.grigorenko@times.uh.edu

1. INTRODUCTION

1.1 Language Skills in Institutionalized Individuals

Language is a fundamental human ability, and it is a fundamental component of many different skills and processes (i.e., memory, executive functions, learning). Like other complex skills, language development is influenced by a variety of genetic and environmental factors and their interactions. One of the key risk and protective factors of language development is linguistic input, defined as an obligatory (i.e. experience-expectant) element of the environment for every individual, as well as access to a caregiver, proper nutrition, and cognitive and sensory stimulation [23, 70]. However, not everyone receives a sufficient amount of linguistic input. Namely, an individual’s linguistic input can be placed on a continuum that ranges from a lack of exposure in an environment to a rich and stimulating environmental experience.



The consequences of the absence of linguistic input were investigated in studies of extreme language deprivation, such as children who were sensorily deprived due to inborn deafness [42] or full social isolation [19]. More subtle, but, correspondingly, more widespread, are cases of children who have not had caregivers to provide them with the necessary linguistic input. Orphaned, abandoned, maltreated and underprivileged children are usually deprived of a rich linguistic environment while being reared in state institutions or being raised in families with low-quality caregiving [70].

Longitudinal and cross-sectional studies have repeatedly examined the relationship between institutionalization and language deficits [7, 20, 21, 58]. Particularly, the following language domains have been reported to be at risk: expressive language skills by the age of 42 months [71]; expressive and receptive vocabulary, and narrative skills by 4-5 years of age [3]; sentence repetition, nonword repetition, and word identification by the age of 8 years [72]; performance on the Comprehensive Assessment of Spoken Language and Clinical Evaluation of Language Fundamentals (Fourth Edition) by age of 8-11 years [38]; sentence comprehension by 8 years of age [14]; and vocabulary skills by the age of 11 years [45]. Studies of institutionalization and their results are very heterogeneous due to variability in the age of placement and the time spent in institutions, quality of institutional settings, following remediation or adoption, transition to different language environments, and so forth. However, despite sample and assessment differences, language abilities of institutionalized individuals are expected to be lower than the population mean in a wide range of domains, including the core language functions described above.

1.2 Vocabulary Skills

Vocabulary (including vocabulary skills, vocabulary knowledge, and lexicon), broadly defined, is the understanding of words and their meanings. Vocabulary indexes the broader ability – lexical skills and processing, which refer to what one knows about a word, its usage, its components – and the word’s phonological, orthographic, and physical forms – and their link to its mental representation [48]. One of the most commonly used classifications of vocabulary skills belongs to Kate Nation [22], who distinguishes receptive vocabulary as comprehending a word in listening and reading, and productive vocabulary as producing a word in speaking and writing.

Vocabulary skills are essential for all core language abilities. Studies have repeatedly shown the association between size and quality of early vocabulary and later development of listening, writing, reading, and speaking skills [5, 27]. This relationship is persistent in adulthood. Andringa and colleagues [1] showed the intuitively comprehensive connection of better vocabulary knowledge with increasing listening comprehension. Moreover, it has been shown that participants’ lexicon size impacts accurate language perception, specifically in the recognition of orally presented words [32], words in lexical decision tasks [73], and speech recognition in adverse conditions [6]. The involvement of vocabulary skills in language production is well investigated, namely in speeded pronunciation, picture naming, and verbal fluency tasks [57, 59, 64, 73]. Similarly, knowledge of word meanings mediated by listening comprehension affects text comprehension in children, adolescence, and adults [51] and vice versa, since a sufficient part of vocabulary learning is done through reading [13, 28].



Being a crucial component of general language abilities, vocabulary skills are a strong indicator of an individual's achievements, especially in education (e.g., [46, 49, 60]). Correspondingly, vocabulary deficits put academic, vocational, and mental health outcomes at risk at various stages of life [2]. Unfortunately, the discrepancies in vocabulary abilities between individuals emerge primarily in childhood and are highly dependent on family and socio-economic background [8, 18]. The research of Hart and Risley [25] demonstrated that by the age of three the amount of words heard by children in high-income families is double that of disadvantaged children. These differences in the quantity of input influence the richness of children's vocabulary, and hence, their later school success [26]. We expect similar effects on individuals raised in institutional care in Russia. First, because the lack of linguistic input has been documented in Russian institutions [47, 63]; and second, because the lexical deficiencies of institutionalized children have been identified worldwide (e.g. [3, 38, 45]). However, the later-life trajectories of language development in institutionalized individuals are largely unknown in Russia. A simple explanation could be that there is a lack of diagnostic assessments of vocabulary and other language-related skills for adults. Such an instrument is especially important for proper diagnosis and the remediation of individuals' language skills.

1.3 Measures Used to Assess Vocabulary

There are several measurement approaches, that examine vocabulary skills. According to McGregor and colleagues [44], there are two directions, namely "breadth and depth", by which one can arrange lexical skills. Vocabulary breadth mainly refers to how many words a person can produce or identify. On the other hand, vocabulary depth requires using words in the whole language structure.

There are multiple standardized tests for adolescents and adults that assess both vocabulary breadth and depth skills in English. To assess vocabulary breadth, one can use word-picture matching tasks (for example, the Peabody picture vocabulary test-fifth edition [16]) or picture naming approaches (like the Expressive vocabulary test-third edition [69]). On the other hand, to investigate depth of word comprehension, word definition tests can be used (i.e., vocabulary Subtests of the Wechsler intelligence scale for children (WISC)-fifth edition [66] or the Wechsler adult intelligence scale (WAIS)-fourth edition [65]). However, in Russia, there is a lack of standardized psychometric tests that evaluate lexical skills in adolescent and adult populations. Russian versions of the WAIS, including its verbal Subtests, were not standardized based on Russian norms and are outdated. The Russian Passive Vocabulary and Active Vocabulary Subtests [75] are designed for 3-9-year-old children and thus are not applicable to adults. While the Russian Aphasia Test (RAT) [31] that is currently in the process of standardization and normalization includes Subtests that assess word production and comprehension skills, it was made for a population with language impairments and fails, and therefore may not address the general population in the best way.

In the middle of the vocabulary test continuum, located along the "depth" and "breadth" axis, there are synonym and verbal analogy tests. In such tests, one does not need to define the word but has to understand the meaning of the word and other linguistic characteristics (for example, morphological). In verbal analogy tests there are usually



three stimulus words: two of them illustrate a logical relationship rule, and for the third, the participant finds a word to complete the analogy, based on the rule between the words in the example. In tests of synonyms, the participant needs to produce or to choose a word with the same meaning as the stimulus word.

There are multiple psychometric batteries, tests of school performance, and aptitude tests that include analogy and synonyms subtests in English. Some of the common current English verbal analogy and synonym tests for adolescents and adults are listed in Table 1. These tests are commonly used to assess both children and adults because the execution time is short, and they simultaneously assess two verbal cognitive abilities, namely, vocabulary skills and reasoning.

Disappointingly, to the best of our best knowledge, Russian clinical language assessments do not include verbal analogy or synonym tests. Existing tests that include such tasks assess academic progress (e.g., Ediny Gosudarstvennyy Ekzamen [Unified State Exam]) and are not designed for the assessment of individual differences. The lack of Russian standardized diagnostic instruments for assessing the language domain in adolescents and adults make it extremely important to develop a valid and reliable language and speech assessment tools, capable of differentiating problems in different language subdomains.

1.4 ARFA-RUS Synonyms Subtest

To fill the gap in Russian psychodiagnostic tools of language assessment in adults and adolescents, the ARFA-RUS Synonyms Subtest was developed. This subtest is part of a large ARFA-RUS battery developed in the Laboratory of the Translational Sciences of Human Development of Saint-Petersburg State University. ARFA-RUS was applied in a large research project studying the bio-behavioral features of the development (with a focus on the language domain) of adult orphanages raised in institutional-care settings. Some data on ARFA-RUS Synonyms Subtest performance as a part of this large research project have already been reported[35]¹.

The ARFA-RUS Synonyms Subtest resembles other synonyms tests with respect to its structure. The aim of this task is to recognize and distinguish all synonymous words from words that are not synonyms. Also, the ARFA-RUS Synonyms Subtest partially resembles verbal analogy tests because it contains an example of synonymous words that provide a model of a correct response. The items on the ARFA-RUS Synonyms Subtest are formulated as yes-no questions, which differentiates this Subtest from listed (Table 1) English synonyms and verbal analogy tests that contain either open or multiple-choice format tasks.

1.5 Item Response Theory (IRT) approach

In modern test theory, item response theory (IRT) is the dominant psychometric paradigm for scale development, analysis, and scoring. IRT assesses the extent to which items evaluate individual differences on some specified construct. Estimates of IRT model parameters provide information about the discriminating power of an item separately from its

¹ In the publication by Kornilov et al. [35], the original name of the ARFA-RUS Synonyms Subtest, that is, “Analogies”, was used. We decided to change the name of the subtest to Synonyms because the new name better reflects the task and structure of the test.



difficulty or severity [61]. Traditionally, IRT models are named according to the number of parameters that are used to model the characteristics of an item. If a single characteristic of the item is modeled (e.g., item difficulty), the IRT model is called a 1-parameter model (1PL). If two characteristics of the item are modeled (e.g., item difficulty and item discrimination), the IRT model is called a 2-parameter model (2PL). When three characteristics of the item are modeled (e.g., item difficulty, item discrimination, and item pseudo-guessing, which is common for a multiple-choice item test), the IRT model is called a 3-parameter model (3PL). In general, IRT provides information about measurement precision across the range of a latent trait at both the item and test level rather than providing only a single reliability estimate for all participants. In the case of the current study, the latent trait under investigation is the ability to distinguish similar from discrepant word pairs. Table 2 summarizes the terminology used in this article in connection with IRT.

The advantages of IRT can be clarified by comparing this approach with Classical Test Theory (CTT). By CTT we are referring to traditional psychometric methods (such as factor analysis and Cronbach's α) based on the idea that a person's observed or obtained score on a test is the sum of his/her true score (error-free score) and error score. CTT concentrates on the entire test, rather than on the responses to items. While CTT methods are easy to compute and interpret, they have some principal limitations, including the (1) assumption of a linear association between the measured latent trait and obtained scores, which rarely corresponds to empirical reality in the case of psychological constructs; and (2) dependency of reliability parameters from sample characteristics and sample size. In contrast to CTT, IRT requires significantly more time and computational resources, large sample sizes for analysis, and the need for stronger assumptions. However, the following benefits of using IRT outweigh its complexity: (1) assumes a nonlinear relationship between the latent trait and test scores, accounting for the random nature of these responses and use of probabilistic models to explain their distribution; (2) provides trait scores at the item level; (3) provides the reliability of each item at different levels of the latent trait, controlling for the characteristics of the items in the scale (e.g., difficulty, discrimination, etc.), that can be especially useful in the identification of items that may contribute little or make distortions to measurement precision; (4) allows for the presence of separate parameters for the effects of the subjects' abilities, skills, or attitudes and the properties of the item; (5) permits independent examination of psychometric properties from sample characteristics [17, 37, 50, 54].

Within the IRT approach, a common practice is to investigate the potential bias of the test and/or items for various subgroups using the differential item and test functions (DIF and DTF, respectively). DIF/DTF occurs when an item/test measures a latent construct differently for one subgroup of a population than it does for another [36, 40]. DIF might be a threat to test validity for one or several subgroups. However, it is not necessarily that the item or test is unfair, because DIF indicates the presence of a latent trait, which might or might not be meaningfully or intentionally related to the targeted construct [41]. In the current study, we will examine the potential bias of test items for two groups of individuals, namely, adults with and without a history of institutionalization. The investigation of the test bias is essential because the Synonyms Subtest



of ARFA-RUS will largely be used for incarcerated adults in future studies, thus the reliability of the items for this subgroup is of the utmost importance.

1.6 Aims

The first aim of the study is to evaluate the psychometric properties of the Synonyms Subtest of the new language battery ARFA-RUS using item response theory (IRT). The second aim is to investigate the potential test and items bias for two groups: individuals who experienced institutional care (IC) and individuals raised in biological family care (BFC). We expect the test to work equally fairly for both groups when we control for the overall differences in the measured ability. Although our main objective is to examine the psychometric properties of the ARFA-RUS Synonyms Subtest, we also demonstrate practical application of IRT models for other areas of cognitive and personality assessments. For this, the decision-making process and analysis are transparently described.

2. METHOD

2.1 Participants

The initial sample for the 1PL and 2PL models included 655 native Russian-speaking individuals who took part in a larger study of the long-term effects of institutionalization (supported by the Government of the Russian Federation). For the group analysis, 5 participants were excluded due to missing information about group, sex, age or other demographic characteristics. The final sample for group analysis consisted of 650 participants (366 females, 284 males) ranging from 15 to 38 years old ($Mdn = 19$, $M = 20.38$, $SD = 4.703$). Of these, 342 had experienced institutional care (IC) and 308 were raised in biological family care (BFC). The inclusion criteria for the IC group were: age ranging from 16 to 35 years old, being native Russian language speakers, and having experienced living in an orphanage or related institution. Exclusion criteria were the presence of: cerebral palsy, epilepsy, brain diseases, genetic abnormalities, systemic autoimmune diseases (e.g. hypothyroidism, systemic lupus erythematosus); metabolic disorders (e.g. metabolic syndrome, hypertension, fibromyalgia), serious brain injuries (e.g., brain surgery; trauma with loss of consciousness) or any traumatic brain injuries in the last 6 months. The BFC group was matched by sex, age, socioeconomic status and educational level. Participants for the IC group were recruited through a number of vocational schools and organizations that support adolescents and young adults left without biological parental care and raised in institutional settings (baby homes and orphanages), located in two large cities in the Russian Federation. Participants for the BFC group were recruited via colleges and social networks.

2.2 Assessment

The ARFA-RUS Synonym Subtest was presented as part of the ARFA-RUS battery. The Synonyms Subtest assesses vocabulary knowledge and the ability to understand synonymy relationships between associated words using a yes-no format. The Subtest includes 25 items. The participant is asked if two presented words have the same meaning or not, and are asked to label them as “Similar” or “Different”. An example of a pair of words that



have similar meanings is also provided (смелый-бесстрашный [smelyj-besstrashnyj], eng. brave-fearless). The two words in each item always represent the same part of speech (noun or adjective) and may or may not have any relationship to each other. Relationships may belong to such semantic classes as synonyms (антропогенный-человеческий [antropogennyj-chelovecheskij], eng. anthropogenic-human), antonyms (комизм-трагизм [komizm-tragizm], eng. comic-tragedy), or affiliation to the same category (меридиан-экватор [meridian-e'kvator], eng. meridian-equator).

Participants were assessed individually; the Synonym Subtest was always the second subtest of the administered battery. It was completed on paper forms by participants, with no time limit. Instruction was provided both in writing (on the paper forms) and auditorially.

2.3 Analytical procedure

All analyses were conducted in the *R* programming environment [52]. The analytical plan was as follows: 1) describe the test and item characteristics across and within the two study groups; 2) investigate the dimensionality of the test; 3) compare the 1PL and 2PL models regarding their fit to the data; 4) perform IRT group analysis for the BFC and IC groups; and 5) examine the differential item functioning for these groups.

The latent dimensionality of the test was examined with exploratory factor analysis. The appropriateness of the factor analysis for the data matrix was verified by the Kaiser–Meyer–Olkin measure, with a sampling adequacy of .86.

To perform the IRT analyses, we used the *ltm* [56] and *mirt* [11] packages. The fit of the models was based on the marginal maximum likelihood / EM (expectation-maximization) algorithm (e.g., [9]). Marginal maximum likelihood is one of the basic estimation techniques in IRT, along with maximum likelihood, conditional maximum likelihood, and the Markov chain Monte Carlo method. The key characteristic of marginal maximum likelihood is the assumption that the participants are randomly sampled from a larger distribution. The estimation is conducted by maximizing the observed data loglikelihood, which depends on latent data and integrating the person effect out of the joint likelihood [33]. It utilizes the approximation of required integrals; to accomplish this approximation, the Gauss-Hermite quadrature rule was used.

Item analysis began with fitting a 1PL model. For each item, the difficulty parameter (b) was estimated and the slope (discrimination) parameter (a) was constrained to be equal. For the 2PL model, the slope (discrimination) parameters and the difficulty parameters were estimated for each item. The terms “easy”, “moderate” and “hard” were used to indicate relative item difficulty. For the interpretation of the slope, as per Baker [4], the following labeling was used: none – 0; very low – 0.01–0.34; low – 0.35–0.64; moderate – 0.65–1.34; high – 1.35–1.69; very high – >1.70; perfect – +infinity.

To choose the best fitting model, the fit indices were investigated: lower values of Akaike information criterion (AIC), Bayesian information criterion (BIC), log-likelihood and higher values of test information were preferable.

A Monte Carlo procedure was used to approximate the distribution of the item-fit statistic. The statistical significance of the test indicates that the null hypothesis should be rejected indicating that the items do not fit the model.



To detect potential test bias, we applied several DIF-methods (*diffR* package [40]), which differed on how the participants were matched on the measured ability. The analyses included classical methods – the Mantel-Haenszel statistic, standardization, and logistic regression – which matched students based on the total scores; IRT-based methods, such as the Wald χ^2 test (also known as Lord’s test [39]) and Raju’s area test [53], which consider student ability as a latent variable, estimated together with item parameters in the model. Those five methods were applied to compare the results, however, we decided to use the Wald χ^2 test of IRT-based methods group as the reference. The first reason is that IRT-based methods are more accurate than classical ones since they measure the latent trait instead of the total score. The second reason is that they allow detecting non-uniform DIF [41].

3. RESULTS

3.1 Descriptive statistics

Table 4 shows the mean, standard deviation, Cronbach’s alpha, skewness, and kurtosis values for the global score of the ARFA-RUS Synonyms Subtest, separately for the IC and the BFC groups. An independent samples t-test found that participants from the BFC group scored significantly higher than the IC group ($t(568) = -19.11, p < .0001$) with a large effect size ($d = -1.61$). Cronbach’s alpha for the global score was acceptable (.80), and was also found to be acceptable for the BFC group (.74), but was poor for the IC group (.58). This issue will be thoroughly examined in the IRT framework since CTT does not clarify between-group differences. Skewness absolute values were $<|1|$, and kurtosis absolute values were $<|3|$, demonstrating sufficient univariate normality. Item descriptives may be found in Supplemental Table 1. As the scale reliability could not be notably improved through any item exclusion, it was concluded that all items were performing adequately. The frequency of correct responses on items varied from 41% to 87%. Mean values for items 1, 3, 9, and 23 exceeded 0.8; thus, these items were determined to be the easiest and should be examined more closely in the IRT analysis. For items 2, 13, 18, and 24, correct responses were less likely, but approximately equal, compared to the likelihood of wrong answers; these items were determined to be the most difficult.

3.2 Dimensionality analysis

First, we conducted Horn’s [29] and a modified parallel analysis [15], which yielded equivocal results, with the former indicating unidimensionality and the latter pointing to the possibility of a second dimension. Therefore, we investigated one- and two-factor exploratory factor solutions. In the one-factor model, the factor eigenvalue was 3.79, which explained 15.2% of the variance in the data. In the next model, two factors cumulatively explained 18.2 % of the variance, with 11.1% uniquely explained by the first factor. Moreover, the examination of factor loadings and the corresponding items revealed that items were clustered together based not on test but method factor. Specifically, the first factor was indicated by items for which the response “similar” was correct, while the second factor included items requiring the “different” response. Since we cannot claim that the cognitive



processes are different when judging those two item types, we considered the second dimension as redundant and further analysis was conducted using unidimensional solutions.

3.3 IRT-model evaluations

Table 5 shows the model fit statistics for the 1-PL, 2-PL, and corrected 2-PL models, and the difficulty and discrimination threshold parameters for each item of the ARFA-RUS Synonyms Subtest.

The 2-PL model was superior to the 1-PL model on the basis of the BIC, AIC, log-likelihood and Likelihood-Ratio (LR) test ($\chi^2(24) = 309.82, p < .001$). In both the 1-PL and the 2-PL models, some items had a poor fit, but the number of misfit items in the 2-PL model was three times less than the 1-PL (see item fit indexes in Table 5). The correlation between the difficulty parameter of the 1-PL and 2-PL models was high ($r = 0.93$). Thus, although the 1- and 2-PL models seemed not to differ much with respect to difficulty, the 2-PL model could be considered the more appropriate model to describe the ARFA-RUS Synonyms Subtest.

In the 2-PL model, all items but 11 and 18, fit the model. These poorly fitting items need to be examined for modification or removal. The difficulty of the items ranged between easy and medium; item 23 was the easiest, while item 24 was the hardest ($b = -2.34$ and 1.07 , respectively). The discrimination parameter was very low for item 12; low for items 13, 15, 18, 24; high for items 5, 9, 20; very high for 3, 14, 19; and moderate for the remaining items. The higher discrimination values indicate that those items are better at discriminating among individuals with low and high latent ability (i.e. the ability to discern similar from discrepant word pairs).

The ICCs of all of the items (Figure 1) indicate the expected increasing probability of responding correctly at higher levels of ability. For the low discrimination items, this increase was shallower, which means that these items differentiate between persons of high and low ability less effectively, that is, persons with different ability levels are likely to respond similarly to these items.

The information function along with the standard error measure for the overall ARFA-RUS Synonyms Subtest demonstrates that the test is most reliable at low-to-moderate levels of the latent trait (right panel of Figure 1). The most information is provided for individuals with ability levels of about -1.0 . At this point, the standard error is the lowest and, conversely, the information is highest, indicating that the test should be considered easy and less able to discriminate individuals at higher ability levels.

Within the CTT framework the exclusion of item 18 did not result in the improved reliability of the entire test as indicated by the Cronbach's α statistic. While analyzed within the IRT framework, this item demonstrated poor item fit and low discrimination, therefore it was removed from the final version of the subtest. This decision was also influenced by concerns regarding the features of the stimuli words: *dekada* [decade] - *stoletiy* [century]). Both words belong to the same semantic category, and differ not qualitatively but rather reflect quantitative differences of the time periods, in contrast to other stimulus pairs.

Vuong's test for non-nested models demonstrated that excluding of item 18 led to a significant improvement of the 2-PL model ($z = -86.53, p < .001$), which was also confirmed by advancing BIC, AIC, and log-likelihood indexes (Table 5).

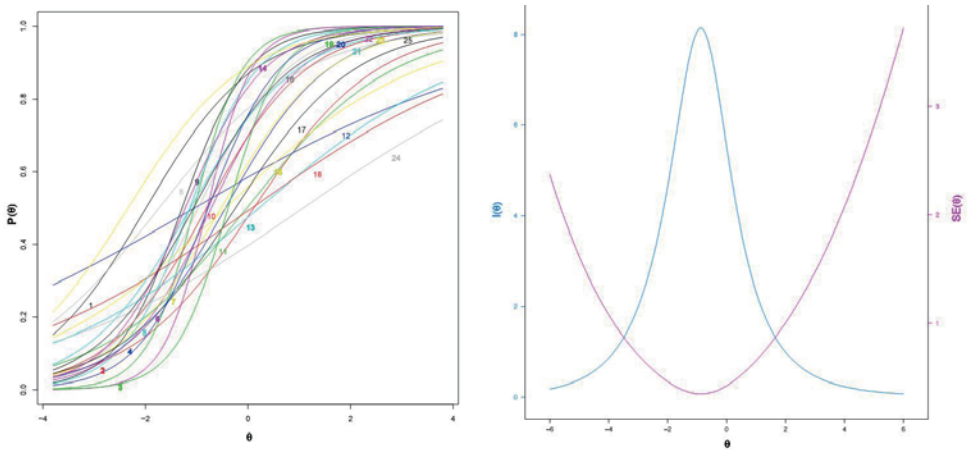


Figure 1. Item characteristic curves for the 2-PL model (left panel) and the test information function with standard error measure for all items of the 2-PL model without item 18 (right panel). The ICCs are highlighted by different colors and numbers. The X-axis represents latent ability levels, the Y-axis (left panel) – probability of the “correct” response, the Y-axis (right panel) – information (blue line) and standard error (pink line)

3.4 Differential test and item functioning

The examination of the differential test and item functioning started with a fully unconstrained model, that is, the discrimination and the difficulty parameters were estimated for each item respective to the group. The analyses revealed little agreement among DIF-detection tests. Still, all of the items were identified as functioning differentially by at least two tests (Supplemental Table 2). However, when none of the items are constrained, the presence of DIF items might influence the estimation of the parameters for non-DIF items, with the latter being wrongly identified as DIF [40]. Namely, without proper item parameters equating among groups, the analysis does not just identify DIF, but might reflect a combination of differential item functioning and latent-trait distribution effects. Therefore, a set of anchor items that will be constrained was needed. For this, we used the unconstrained model as a reference and compared it via likelihood-ratio tests with the models where group equality constraints were added to the difficulty and discrimination parameters for each item one by one (see [12]). Thus, eleven items were found to be invariant and were used as anchors. There was no statistically significant difference between the final multigroup model with anchors and the fully unconstrained model ($\chi^2(df) = 19.48(20), p = .491$), proving that the anchor usage did not dramatically change the estimation.

The final model demonstrated adequate fit based on the M2* family of statistics with $M2^*(df) = 890.857$, CFI = .808, RMSEA = .035, and an SRMSR of .072 and .071 for the BFC and IC groups, respectively. Note that the CFI value is slightly lower than the suggested thresholds [30], which might indicate the preference for a more restricted model. The reference latent mean and variance in the BFC group were fixed to 0 and 1, respectively. The estimated latent mean for the IC group was -1.622 with the variance 0.378,



suggesting that the IC had a notably lower estimated ability on the test and more homogeneous responses. Additionally, whereas the latent factor accounted for 26.4 % of the BFC group scores (eigenvalue = 6.34), it explained half of the variance of the IC group scores (12.5 %, eigenvalue = 3.00). The Wald χ^2 test revealed the presence of DIF in six items. The DIF test results, as well as item parameters for each group, are presented in Table 6. Non-uniform or crossing DIF was also detected. That is, some items favored the BFC group on one level of latent ability and the IC group on another. For items 1, 8 and 23, the probability of correct responses was above 0.5 even on the lowest ability levels for the IC group. Furthermore, the trace lines for items 11 and 12 had negative slopes for the IC group; in other words, the probability of the correct answers decreased for higher ability participants in the IC group, indicating non-monotonicity of their responses to these items. The above-mentioned effects are displayed in Figure 2.

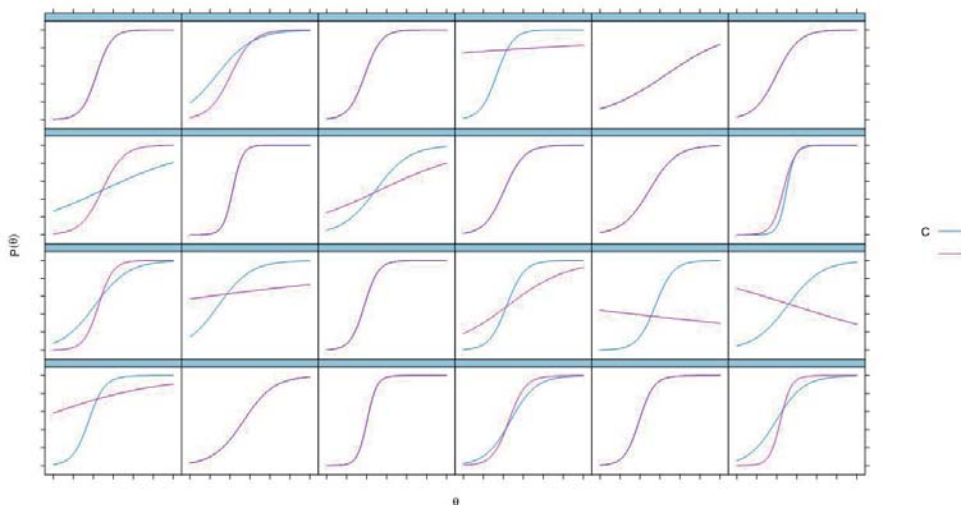


Figure 2. Item characteristic curves for the BFC and IC groups. The X-axis represents latent ability levels, the Y-axis – probability of the “correct” response. Items 2, 3, 5, 9, 14, 16, 17, 20, 22, 24, 25 were used as anchors, therefore their parameters are equivalent across groups. Item 18 was eliminated in the previous analysis steps

The practical implementation of DIF analysis is related to the question of whether any specific item demonstrates a bias favoring a specific group; dropping such an item will improve test fairness for groups, disadvantaged by such an item. Importantly, one can investigate the differential functioning of the whole test (DTF); even if some items demonstrate DIF, it does not always lead to overall test bias (e.g., DTF). The omnibus tests revealed that the average amount of test scoring bias (signed DTF) between the response curves of the two groups was 0.35 of a raw test score (1.43 % of the total score) favoring the BFC group, while the absolute deviations in item properties over the test (unsigned or total DTF, which disregards the bias towards the specific group) was 1.38 points (5.76 % of the total score). The expected total scores for both groups and the illustration of the changes in the overall

test bias across all ability levels are in Figure 3. The results indicate that at the lower end of ability, the ARFA-RUS Synonyms Subtest favors the IC group, but from the theta level of -1.4 to the highest ability levels, the test favors the BFC group.

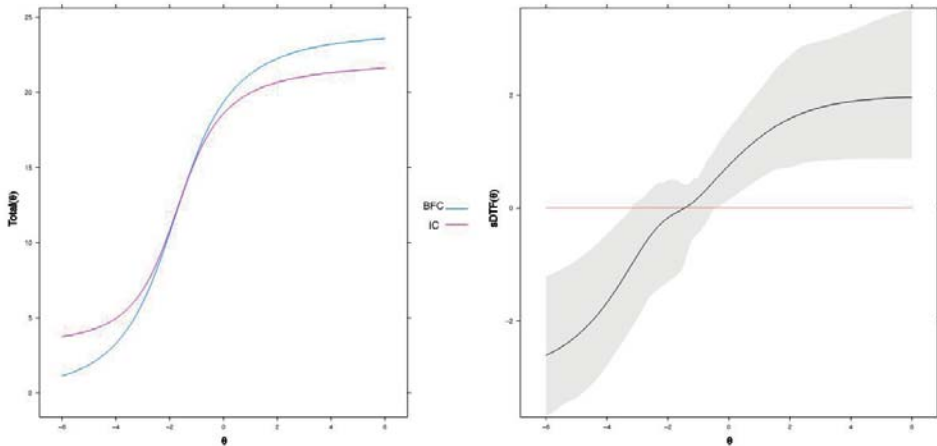


Figure 3. Expected total test score for the IC and BFC groups (left panel), and differential test functioning (right panel). The X-axis represents latent ability levels, the Y-axis (left panel) – score on the ARFA-RUS Synonyms Subtest (max = 24), and the Y-axis (right panel) represents sDTF – signed differential test functioning. Negative values of sDTF indicate that the reference (BFC) group scores lower than the focal group (IC), positive values indicate the opposite

3.5 Discussion

The implementation of standardized and valid instruments is crucial for both practice and research purposes in studies of individual differences and clinical research. The lack of reliable standardized methods for assessing language abilities in Russia has encouraged researchers to develop new approaches from scratch. Once the test is developed, however, its psychometric properties must be evaluated.

The ARFA-RUS Synonyms Subtest was created in the Laboratory of Translational Sciences of Human Development of Saint-Petersburg State University as a part of the ARFA-RUS language battery. The Subtest was used to investigate the lexical skills of participants with a history of being reared in institutional care settings, as well as their peers raised in biological families. In the current study, we addressed the reliability of the ARFA-RUS Synonyms Subtest and investigated to what extent the Subtest can be used in the study groups without DTF.

First, to determine the applicability of the ARFA-RUS Synonyms Subtest for research and practice we evaluated its psychometric properties using item response theory (IRT). The dimensionality check revealed some evidence of a second dimension. In the two-factor exploratory model, one factor was formed by items requiring the answer “similar”, while the second factor – by items requiring the “different” response. There is evidence that the identification of synonyms and antonyms measure one domain of cognitive abilities, yet a



small proportion of the variance is explained by a method factor [67]. Thus, in this article the unidimensional model was used, however, future work should specifically prove that the latent construct is independent of the selected method of measure. Subsequently, we estimated 1-PL and 2-PL models, and the latter was preferred based on the model fit indices and likelihood comparison. We eliminated one item because it had a poor fit, low discrimination, and, more importantly, raised concerns regarding its content. The final 2-PL model with 24 items had an adequate fit; all except two items fitted the model well; the discrimination parameter varied with five items demonstrating low discrimination power and others moderate-to-high discrimination. The item difficulty ranged between easy and medium levels (from -2.38 to 1.07). In general, the IRT demonstrated that the test is reliable at low-to-moderate levels of ability to understand the relationship between synonyms (i.e., the ability to understand the differences associated with similar versus discrepant word pairs); this observation corresponds to the notion of acceptable internal consistency of the global test scores calculated with CTT. However, to capture a wider ability range, more difficult items are needed.

The second aim was to investigate the equality of the test and items for the two subgroups, namely, the average adults raised in biological families and adults who experienced living in institutional care. The IRT analyses discovered that adults with a history of institutionalization had a lower latent mean, and the presence of the latent factor explained the considerably lower percentage of the variance in their scores in comparison with the reference group. Moreover, the adults with a history of institutionalization scored more unfavorably on the test, that is, received negatively biased test scores. However, the bias was inconsistent: at the lower end of ability, the Subtest favored the institutionalized group, but from the theta level of -1.4 to the highest ability levels, the test favored the reference group. Specifically, we detected six non-uniform or crossing differentially functioning items. That is, these items were unequal for the two subgroups, even when their differences in the latent ability were controlled. Furthermore, items 11 and 12 revealed paradoxical patterns: the decreased probability of correct response at higher ability levels. Since those items worked well for the reference group of average adults, we are not going to modify them; however, they should be removed when used for special populations or non-average subgroups. Overall, the ARFA-RUS Synonyms Subtest demonstrated DTF and was found to be less appropriate for individuals with early experience of institutionalization (i.e., individuals whose early language input might have been challenged). The trend was also reflected by a poor Cronbach's alpha value in the post-institutionalized group in contrast with acceptable indices for the reference group.

We hypothesize that the group discrepancy may be due to the existence of a second latent trait that was unintentionally measured with our construct of interest. To successfully perform verbal analogies tests, different components of executive functions are needed [55]. Executive functioning is known to be altered in post-institutionalized children [43], and those alterations might be persistent; therefore, we assume that executive functions may be an uncontrolled latent trait in adult samples, too. However, to explore this assumption, further investigations are needed.

Also, since the group of post-institutionalized adults had, on average, lower ability in the synonymy identification than the reference group, they could have used the guessing strategy more frequently to solve the task. The chance answers might partially explain the



inconsistent difficulty-to-probability item curves in that group. The limitation of the current study is that we restricted the IRT analysis to the one- and two-parametric models, however, a future direction of the study might be to use a more advanced model with guessing parameter (3-PL) to investigate the issue in greater detail.

The IRT approach to psychometric analyses has been used worldwide for decades and has proven its effectiveness. Although it has provided several advantages over traditional psychometric approaches, it is not a routine part of test development and evaluation in Russia. It is possible that IRT is rarely chosen because it requires more statistical knowledge and large sample sizes, and in psychology and related fields, investigators might intentionally or unintentionally choose confirmatory factor analysis over IRT to appraise the psychometric characteristics of the instruments they develop ([74]; see [62] and [34] for CFA and IRT comparison). In the current study, all steps were described as transparently as possible to encourage the utilization of IRT for further research in the field of test development and psychometric evaluation in Russia.

Table 1

**English Verbal Analogy and Synonyms tests suitable
 for the assessment of adolescents and adults**

Group of tests	Test, Subtest	Description
Verbal Analogy	Clinical evaluation of language fundamentals – Fifth Edition. CELF-5, <i>Word Classes</i> (Wiig et al., 2013) [68]	Age range: 5:0 – 21:11 Task format: multiple-choice Task: to identify two words (or pictures) that are related by semantic features, function, place, or time from a list of four words
	Test of Adolescent and Adult Language – 4th Edition. TOAL-4, <i>Spoken Analogies</i> (Hammill et al., 2007) [24]	Age range: 12:0 – 24:11 Task format: open Task: to finish an examiner’s partial analogous sentence with a word to complete the analogy.
Synonyms	Test of Adolescent and Adult Language – 4th Edition. TOAL-4, <i>Word Similarities</i> (Hammill et al., 2007) [24]	Age range: 12:0 – 24:11 Task format: open Task: to write a synonym (correct spelling is irrelevant) for a printed stimulus word.
	Comprehensive Assessment of Spoken Language – Second Edition. CASL-2, <i>Synonyms</i> (Carrow-Woolfolk, 2017) [10]	Age range: 3 – 21 Task format: multiple-choice Task: to identify, using a list of four words, a word synonymous to the target word.
	Expressive Vocabulary Test-Third Edition. EVT-3, <i>last 52 items of the test</i> (Williams, 2018) [69]	Age range: 2:6 – 90+ Task format: open Task: to provide a synonym to the presented word or a spoken phrase

Note: Age range – range of ages for which the test is applicable; Task format – format of questions; Task – brief description of the task.



Table 2

Item Response Theory: key terms and definitions

Term	Definition
Latent ability/trait (theta, θ)	IRT model parameter that indicates unobservable construct (latent trait) being measured by a scale.
Item difficulty parameter (b , β)	IRT model parameter that indicates the difficulty (or severity) of an item response. β
Item discrimination or slope parameter (a , α)	An item parameter that indicates the strength of relation between an item and the measured construct or latent trait (θ). The slope parameter is usually positive (negative values mean the positive responses to the item are associated with lower values of the trait being measured, which usually means the item is keyed incorrectly).
Information function/curve	A function that indicates the range over the construct being measured (θ) for which an item or scale is most useful for discriminating among individuals.
Differential item functioning (DIF)	DIF occurs when subgroups from a population perform differently on an item after controlling for the overall differences between subgroups on the latent trait that was measured. There are two types of DIF. The uniform DIF represents the difference in success probabilities of subgroups that is constant across the latent ability levels. That is, an item consistently gives one subgroup an advantage. If the subgroup differences are not constant across ability levels but depend on it, that is the nonuniform or crossing DIF.
Unidimensionality assumption	Assumes that one underlying (or dominant) factor accounts for a person's response to a question within the scale.

Table 3

Sample characteristics

Variable		IC	BFC	Overall
Overall		308	342	650
Age (years)		M = 19.13, SD = 4.08	M = 21.51, SD = 4.94	M=20.38 SD = 4.70
Entrance Age	0-4 years	67 (19.59%)	–	–
	5-12 years	147 (42.98%)	–	–
	3-16 years	81 (23.68%)	–	–
	NA	13 (3.80%)	–	–



Variable		IC	BFC	Overall
Duration of institutionalization	0-2 years	36 (10.53%)	–	–
	>2 years	255 (74.56%)	–	–
	NA	17 (4.97%)	–	–
Education	higher education and uncompleted higher education	6 (1.94%)	70 (20.47%)	76 (11.69%)
	secondary education and uncompleted secondary education	157 (50.97%)	129 (37.72%)	286 (44%)
	secondary professional education	129 (41.88%)	127 (37.13%)	256 (39.38%)
	NA	16 (6.19%)	16 (4.68%)	32 (4.92%)
Educational program during school	standard	233 (75.65%)	338 (98.83%)	571 (87.85%)
	corrected for special educational needs	75 (21.93%)	3 (0.88%)	78 (12%)
	NA	0 (0%)	1 (0.29%)	1 (0.15%)

Note: Entrance Age – age of placement in institutional care settings, M – mean, SD – standard deviation, IC – institutional care group, BFC – biological family group, NA – missing value.

Table 4

Mean, standard deviation, Cronbach's α , skewness, and kurtosis values for the ARFA-RUS Synonyms Subtest

Variable	IC	BFC	Overall
Mean	13.21	19.08	16.44
SD	3.63	3.71	4.71
Range	5-25	9-25	5-25
Cronbach's alpha	.58	.74	.80
Skewness	0.26	-0.74	-0.18
Kurtosis	2.81	2.92	2.05

Note: SD – standard deviation, IC – institutional care group, BFC – biological family group.



Table 5

IRT analyses results of the ARFA-RUS Synonyms Subtest

Model	1-PL		2-PL			2-PL without item № 18		
Model fit	AIC = 18644.76, BIC = 18761.44, Log-likelihood = -9296.38		AIC = 18382.94, BIC = 18607.32, Log-likelihood = -9141.47			AIC = 17501.7, BIC = 17717.11, Log-likelihood = -8702.85		
Item no.	<i>b</i>	Item fit	<i>a</i>	<i>b</i>	Item fit	<i>a</i>	<i>b</i>	Item fit
1	-2.04	<i>p</i> = 1.000	0.95	-1.99	<i>p</i> = 1.000	0.93	-2.03	<i>p</i> = 1.000
2	0.11	<i>p</i> = .980	0.83	0.11	<i>p</i> = 1.000	0.84	0.11	<i>p</i> = 1.000
3	-1.67	<i>p</i> = .010	2.14	-1.05	<i>p</i> = 1.000	2.14	-1.05	<i>p</i> = 1.000
4	-0.46	<i>p</i> = .604	1.00	-0.44	<i>p</i> = .941	0.10	-0.44	<i>p</i> = .356
5	-1.56	<i>p</i> = .010	1.53	-1.14	<i>p</i> = .386	1.49	-1.15	<i>p</i> = .198
6	-0.84	<i>p</i> = .545	1.17	-0.72	<i>p</i> = .891	1.16	-0.72	<i>p</i> = 1.000
7	-0.54	<i>p</i> = .535	0.97	-0.52	<i>p</i> = .277	0.98	-0.52	<i>p</i> = .366
8	-1.42	<i>p</i> = 1.000	0.71	-1.74	<i>p</i> = .975	0.70	-1.77	<i>p</i> = 1.000
9	-1.80	<i>p</i> = .020	1.57	-1.29	<i>p</i> = 1.000	1.53	-1.30	<i>p</i> = .574
10	-0.87	<i>p</i> = .100	1.03	-0.81	<i>p</i> = .792	1.95	-0.80	<i>p</i> = .842
11	-0.02	<i>p</i> = .594	0.70	-0.02	<i>p</i> = .010	0.68	-0.02	<i>p</i> = .020
12	-0.44	<i>p</i> = .970	0.33	-1.05	<i>p</i> = .277	0.31	-1.11	<i>p</i> = .485
13	0.11	<i>p</i> = .861	0.48	0.21	<i>p</i> = .861	0.49	0.21	<i>p</i> = .931
14	-1.27	<i>p</i> = .010	2.32	-0.80	<i>p</i> = .792	2.32	-0.79	<i>p</i> = .762
15	-0.29	<i>p</i> = .891	0.53	-0.44	<i>p</i> = .584	0.53	-0.44	<i>p</i> = 1.000
16	-1.13	<i>p</i> = .030	1.17	-0.97	<i>p</i> = .703	1.17	-0.97	<i>p</i> = .673
17	-0.23	<i>p</i> = .980	0.87	-0.24	<i>p</i> = .564	0.88	-0.24	<i>p</i> = .564
18	0.03	<i>p</i> = .178	0.40	0.08	<i>p</i> = .049	–	–	–
9	-0.55	<i>p</i> = .010	1.94	-0.39	<i>p</i> = .941	1.92	-0.39	<i>p</i> = .832
20	-1.02	<i>p</i> = .119	1.46	-0.78	<i>p</i> = 1.000	1.45	-0.78	<i>p</i> = .693
21	-1.17	<i>p</i> = .753	0.97	-1.12	<i>p</i> = .970	0.98	-1.11	<i>p</i> = .792
22	-1.55	<i>p</i> = .010	1.31	-1.22	<i>p</i> = .406	1.30	-1.23	<i>p</i> = .267
23	-2.29	<i>p</i> = .861	1.31	-2.34	<i>p</i> = .277	0.87	-2.38	<i>p</i> = .049
24	0.50	<i>p</i> = .832	0.39	1.07	<i>p</i> = .990	0.39	1.07	<i>p</i> = .980
25	-1.16	<i>p</i> = .891	1.05	-1.06	<i>p</i> = 1.000	1.04	-1.06	<i>p</i> = .723

Note: *a* – discrimination, *b* – difficulty. AIC – Akaike information criteria, BIC – Bayesian information criterion. Item fit was calculated by Monte Carlo simulation. Poorly fitting items have *p* < .05 (marked in bold).



Table 6

Difficulty and discrimination parameters in the IC and BFC groups

Item no.	BFC		IC		Wald χ^2, p -value
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	
1	1.24	-2.46	0.16	-8.07	10.86, $p = .014$
2	0.66	-0.63	–	–	–
3	2.05	-1.96	–	–	–
4	0.78	-1.28	1.21	-1.44	0.32, $p = .854$
5	1.36	-2.08	–	–	–
6	0.72	-2.06	1.84	-1.63	3.89, $p = .207$
7	0.59	-1.83	1.37	-1.48	2.74, $p = .300$
8	0.61	-3.15	0.06	-10.86	7.70, $p = .046$
9	1.43	-2.23	–	–	–
10	1.13	-1.65	0.33	-1.52	10.31, $p = .015$
11	1.10	-0.46	-0.05	-10.30	37.00, $p < .001$
12	0.58	-0.90	-0.14	-0.39	23.96, $p < .001$
13	0.20	-1.03	0.92	-1.11	4.87, $p = .143$
14	2.04	-1.72	–	–	–
15	0.59	-1.09	0.21	-0.67	3.01, $p = .289$
16	0.99	-1.91	–	–	–
17	0.74	-1.06	–	–	–
19	2.31	-1.01	1.70	-1.33	5.35, $p = .128$
20	1.32	-1.68	–	–	–
21	0.55	-3.30	0.90	-1.91	1.66, $p = .472$
22	1.22	-2.17	–	–	–
23	1.22	-2.67	0.04	-30.31	13.87, $p = .004$
24	0.30	0.59	–	–	–
25	0.89	-2.02	–	–	–

Note: *a* – discrimination, *b* – difficulty. Items 2, 3, 5, 9, 14, 16, 17, 20, 22, 24, 25 were used as anchors, therefore their parameters are equivalent across groups (marked with en-dashes). Item 18 was eliminated in the previous steps of analysis.



References

1. Andringa S. et al. Determinants of Success in Native and Non-Native Listening Comprehension: An Individual Differences Approach // *Language Learning*. 2012. № SUPPL. 2 (62). С. 49–78.
2. Armstrong R. et al. Change in receptive vocabulary from childhood to adulthood: associated mental health, education and employment outcomes // *International Journal of Language and Communication Disorders*. 2017.
3. Asimina, Ralli M., Melpomeni S., Alexandra T. Language and Psychosocial Skills of Institutionalized Children in Greece // *The Open Family Studies Journal*. 2017. № 1 (9). С. 76–87.
4. Baker F.B. The basics of item response theory / F.B. Baker, ERIC, 2001. 186 с.
5. Beck I.L., McKeown M.G. Increasing young low-income children’s oral vocabulary repertoires through rich and focused instruction // *Elementary School Journal*. 2007. № 3 (107). С. 251–271.
6. Bent T. et al. Individual differences in the perception of regional, nonnative, and disordered speech varieties // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2016. № 5 (140). С. 3775–3786.
7. Beverly B.L., McGuinness T.M., Blanton D.J. Communication and academic challenges in early adolescence for children who have been adopted from the former Soviet Union // *Language, Speech, and Hearing Services in Schools*. 2008. № 3 (39). С. 303–313.
8. Biemiller A., Slonim N. Estimating root word vocabulary growth in normative and advantaged populations: Evidence for a common sequence of vocabulary acquisition // *Journal of Educational Psychology*. 2001.
9. Bock R.D., Aitkin M. Marginal maximum likelihood estimation of item parameters: Application of an EM algorithm // *Psychometrika*. 1981. № 4 (46). С. 443–459.
10. Carrow-Woolfolk E. *Comprehensive Assessment of Spoken Language—Second Edition (CASL-2)*. Torrance, CA: Western Psychological Services, 2017.
11. Chalmers R.P. Mirt: A multidimensional item response theory package for the R environment // *Journal of Statistical Software*. 2012. № 6 (48).
12. Chalmers R.P., Counsell A., Flora D.B. It Might Not Make a Big DIF: Improved Differential Test Functioning Statistics That Account for Sampling Variability // *Educational and Psychological Measurement*. 2016. № 1 (76). С. 114–140.
13. Cunningham A.E., Stanovich K.E. What Reading Does for the Mind // *American Educator*. 1998. № 1 (22). С. 137–149.
14. Desmarais C. et al. Sentence comprehension in postinstitutionalized school-age children // *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2012. № 1 (55). С. 45–54.
15. Drasgow F., Lissak R.I. Modified parallel analysis: A procedure for examining the latent dimensionality of dichotomously scored item responses. // *Journal of Applied Psychology*. 1983.
16. Dunn D.M. *Peabody picture vocabulary test-fifth edition*. Bloomington, MN.: Pearson, 2019.
17. Embretson S.E., Reise S.P. *Item response theory for psychologists* Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 2000.
18. Fernald A., Marchman V.A., Weisleder A. SES differences in language processing skill and vocabulary are evident at 18 months // *Developmental Science*. 2013.
19. Fromkin V. et al. The development of language in genie: a case of language acquisition beyond the “critical period” // *Brain and Language*. 1974. № 1 (1). С. 81–107.
20. Gindis B. Cognitive, Language, and Educational Issues of Children Adopted from Overseas Orphanages // *Journal of Cognitive Education and Psychology*. 2005. № 3 (4). С. 291–315.
21. Glennen S., Bright B.J. Five years later: Language in school-age internationally adopted children // *Seminars in Speech and Language*. 2005. Т. 26. № 1. 86–101 с.
22. Goulden R., Nation P., Read J. How large can a receptive vocabulary be? // *Applied Linguistics*. 1990. № 4 (11). С. 341–363.



23. Greenough W.T., Black J.E., Wallace C.S. Experience and brain development. // *Child development*. 1987. № 3 (58). C. 539–559.
24. Hammill D.D. et al. TOAL-4: Test of Adolescent and Adult Language—Fourth Edition // 2007.
25. Hart B., Risley T.R. Meaningful differences in the everyday experience of young American children. / B. Hart, T.R. Risley, Paul H Brookes Publishing, 1995.
26. Hart B., Risley T.R. The early catastrophe: The 30 million word gap by age 3 // *American educator*. 2003. № 1 (27). C. 4–9.
27. Hemphill L., Tivnan T. The Importance of Early Vocabulary for Literacy Achievement in High-Poverty Schools // *Journal of Education for Students Placed at Risk (JESPAR)*. 2008. № 4 (13). C. 426–451.
28. Hiebert E.H., Kamil M.L. Teaching and learning vocabulary: Bringing research to practice Routledge, 2005. 1–279 c.
29. Horn J.L. A rationale and test for the number of factors in factor analysis // *Psychometrika*. 1965. № 2 (30). C. 179–185.
30. Hu L.T., Bentler P.M. Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives // *Structural Equation Modeling*. 1999. № 1 (6). C. 1–55.
31. Ivanova M. et al. AutoRAT at your fingertips: Introducing the new Russian Aphasia Test on a tablet // *Frontiers in Psychology*. 2016. (7).
32. Janse E., Jesse A. Working memory affects older adults' use of context in spoken-word recognition // *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. 2014. № 9 (67). C. 1842–1862.
33. Johnson M.S. Marginal maximum likelihood estimation of item response models in R // *Journal of Statistical Software*. 2007. № 10 (20). C. 1–24.
34. Kamata A., Bauer D.J. A note on the relation between factor analytic and item response theory models // *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*. 2008. № 1 (15). C. 136–153.
35. Kornilov S.A. et al. Language Outcomes in Adults with a History of Institutionalization: Behavioral and Neurophysiological Characterization // *Scientific Reports*. 2019. № 1 (9). C. 4252.
36. Langer M.M. et al. Item response theory detected differential item functioning between healthy and ill children in quality-of-life measures // *Journal of Clinical Epidemiology*. 2008. № 3 (61). C. 268–276.
37. Linden W.J. van der Handbook of item response theory CRC Press, 2016. 1–595 c.
38. Loman M.M. et al. Postinstitutionalized children's development: Growth, cognitive, and language outcomes // *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics*. 2009. № 5 (30). C. 426–434.
39. Lord F.M. Applications of item response theory to practical testing problems Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1980. 1–274 c.
40. Magis D. et al. A general framework and an R package for the detection of dichotomous differential item functioning // *Behavior Research Methods*. 2010. № 3 (42). C. 847–862.
41. Martinková P. et al. Checking equity: Why differential item functioning analysis should be a routine part of developing conceptual assessments // *CBE Life Sciences Education*. 2017. № 2 (16). C. rm2.
42. Mayberry R.I. Cognitive development in deaf children: The interface of language and perception in neuropsychology // *Handbook of Neuropsychology*. 2002. № Part II (8). C. 71–107.
43. McDermott J. et al. Psychosocial deprivation, executive functions, and the emergence of socio-emotional behavior problems // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2013. T. 7. 167 c.
44. McGregor K.K. et al. Children with developmental language impairment have vocabulary deficits characterized by limited breadth and depth // *International Journal of Language and Communication Disorders*. 2013. № 3 (48). C. 307–319.
45. Merz E.C., McCall R.B., Wright A.J. Attention and language as mediators of academic outcomes following early psychosocial deprivation // *International Journal of Behavioral Development*. 2013. № 5 (37). C. 451–459.



46. Milton J., Treffers-Daller J. Vocabulary size revisited: The link between vocabulary size and academic achievement // *Applied Linguistics Review*. 2013.
47. Muhamedrahimov R.J. et al. Structural characteristics of the institutional environment for young children // *Psychology in Russia: State of the Art*. 2016.
48. Nation K. Lexical learning and lexical processing in children with developmental language impairments // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2014. T. 369. № 1634. 20120387 c.
49. National Reading Panel Teaching children to read: An evidence-based assessment of the scientific research literature on reading and its implications for reading instruction // NIH Publication No. 00-4769. 2000.
50. Paek I., Cole K. Using R for Item Response Theory Model Applications / I. Paek, K. Cole, Routledge, 2019.
51. Quinn J.M., Wagner R.K. Using Meta-analytic Structural Equation Modeling to Study Developmental Change in Relations Between Language and Literacy // *Child Development*. 2018. № 6 (89). C. 1956–1969.
52. R Core Team (2019) R: A language and environment for statistical computing. // Accessed 1st April 2019. 2019.
53. Raju N.S. The area between two item characteristic curves // *Psychometrika*. 1988. № 4 (53). C. 495–502.
54. Reise S.P., Henson J.M. A discussion of modern versus traditional psychometrics as applied to personality assessment scales // *Journal of personality assessment*. 2003. № 2 (81). C. 93–103.
55. Richland L.E., Burchinal M.R. Early Executive Function Predicts Reasoning Development // *Psychological Science*. 2012. № 1 (24). C. 87–92.
56. Rizopoulos D. Irm: An R package for latent variable modeling and item response theory analyses // *Journal of Statistical Software*. 2006. № 5 (17). C. 1–25.
57. Rodríguez-Aranda C., Jakobsen M. Differential contribution of cognitive and psychomotor functions to the age-related slowing of speech production // *Journal of the International Neuropsychological Society*. 2011. № 5 (17). C. 807–821.
58. Scott K.A., Roberts J.A., Glennen S. How well do children who are internationally adopted acquire language? a meta-analysis // *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2011. № 4 (54). C. 1153–1169.
59. Shao Z. et al. What do verbal fluency tasks measure? Predictors of verbal fluency performance in older adults // *Frontiers in Psychology*. 2014. № JUL (5). C. 772.
60. Stahl S.A., Fairbanks M.M. The Effects of Vocabulary Instruction: A Model-Based Meta-Analysis // *Review of Educational Research*. 1986.
61. Steinberg L., Thissen D. Item response theory. Oxford library of psychology. / New York, NY, US: Oxford University Press, 2013. 336–373 c.
62. Takane Y., Leeuw J. De On the relationship between item response theory and factor analysis of discretized variables // *Psychometrika*. 1987. № 3 (52). C. 393–408.
63. Tirella L.G. et al. Time use in Russian Baby Homes // *Child: Care, Health and Development*. 2008.
64. Unsworth N., Spillers G.J., Brewer G.A. Variation in verbal fluency: A latent variable analysis of clustering, switching, and overall performance // *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. 2011. № 3 (64). C. 447–466.
65. Wechsler D. Wechsler adult intelligence scale—Fourth Edition (WAIS–IV). San Antonio, TX: Pearson, 2008.
66. Wechsler D. Wechsler intelligence scale for children—Fifth Edition (WISC–V) Bloomington, MN: Pearson, 2014.



67. Widhiarso W. Haryanta Examining method effect of synonym and antonym test in verbal abilities measure // *Europe's Journal of Psychology*. 2015.
68. Wiig E.H., Secord W.A., Semel E. *Clinical evaluation of language fundamentals: CELF-5* Bloomington, MN: Pearson, 2013.
69. Williams K. *Expressive vocabulary test*, third edition. Bloomington, MN: Pearson, 2018.
70. Windsor J. et al. Language acquisition with limited input: Romanian institution and foster care // *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2007. № 5 (50). C. 1365–1381.
71. Windsor J. et al. Effect of foster care on young children's language learning // *Child Development*. 2011. № 4 (82). C. 1040–1046.
72. Windsor J. et al. Effect of foster care on language learning at eight years: Findings from the Bucharest early intervention project // *Journal of Child Language*. 2013. № 3 (40). C. 605–627.
73. Yap M.J. et al. Individual differences in visual word recognition: Insights from the English Lexicon Project // *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 2012. № 1 (38). C. 53–79.
74. Zanon C. et al. An application of item response theory to psychological test development // *Psicologia: Reflexão e Crítica*. 2016. № 1 (29). C. 1–10.
75. Prikhoda N.A. Russian Language Development Assessment as a Standardized Technique for Assessing Communicative Function in Children Aged 3–9 Years. *Psikhologicheskaya nauka i obrazovanie = Psychological Science and Education*, 2016. Vol. 21, no. 3, pp. 25–33. doi:10.17759/pse.2016210304. (In Russ., abstr. in Engl.)

Electronic supplementary material

Below is the link to the electronic supplementary material.

1. <https://mfr.osf.io/render?url=https%3A%2F%2Fosf.io%2F93hdx%2Fdownload>



Схожи или отличны? Применение Item Response Theory для анализа теста «Синонимы» на выборке взрослых с опытом и без опыта институционализации

Логвиненко Т.И.*

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7430-1963>,
e-mail: logvinenkota.spb@gmail.com

Таланцева О.И.**

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7555-1216>,
e-mail: talantcevaoksana@gmail.com

Волохова Е.М.***

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1711-0447>,
e-mail: human.nerpa@gmail.com

Халаф Ш.****

Университет Хьюстона, Хьюстон, США,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8809-590X>,
e-mail: shiva.khalaf@times.uh.edu

Григоренко Е.Л.*****

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия;
Университет Хьюстона, Хьюстон, США,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9646-4181>, e-mail:
elena.grigorenko@times.uh.edu

В России существует недостаток валидных и стандартизированных инструментов для оценки языкового домена у подростков и взрослых. Для восполнения этого пробела была создана языковая тестовая батарея ARFA-RUS...

Для цитаты:

Логвиненко Т.И., Таланцева О.И., Волохова Е.М., Халаф Ш., Григоренко Е.Л. Схожи или отличны? Применение Item Response Theory для анализа теста «Синонимы» на выборке взрослых с опытом и без опыта институционализации // Моделирование и анализ данных. 2020. Том 10. № 1. С. 35–63. DOI: 10.17759/mda.2020100102 (In Engl., abstr. In Russ.)

**Логвиненко Татьяна Игоревна*, Инженер-исследователь лаборатории междисциплинарных исследований развития человека, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7430-1963>, e-mail: logvinenkota.spb@gmail.com

***Таланцева Оксана Игоревна*, Инженер-исследователь лаборатории междисциплинарных исследований развития человека, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7555-1216>, e-mail: talantcevaoksana@gmail.com



Методика использовалась в масштабном исследовательском проекте, посвященном долгосрочным эффектам институционального ухода на развитие человека. В настоящей работе в качестве первого шага валидации методики мы изучили психометрические свойства субтеста «Синонимы» батареи ARFA-RUS с помощью подхода item response theory (IRT). Результаты IRT-анализа показали надёжность теста для оценки низких и средних уровней способности, однако тест требуется дополнить более сложными заданиями, чтобы охватить больший диапазон способности. Субтест «Синонимы» батареи ARFA-RUS оказался слабо подходящим для группы взрослых с опытом институционализации: в этой группе вычисленная латентная переменная объясняла значительно меньшую долю дисперсии по сравнению с группой взрослых, воспитанных в биологических семьях. На уровне отдельных заданий два вопроса продемонстрировали парадоксальные закономерности: вероятность правильного ответа уменьшалась при увеличении способности. Кроме того, одно задание было исключено из окончательной версии субтеста «Синонимы» из-за его плохого соответствия модели и низкой дискриминативной способности.

Ключевые слова: Item Response Theory, психометрика, дифференцированное функционирование заданий, языковые способности, синонимы, тестирование.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации, грант № 14.Z50.31.0027 «Влияние ранней депривации на био-поведенческие показатели развития ребенка», ведущий ученый – Григоренко Е.Л.

*****Волохова Екатерина Михайловна**, Инженер-исследователь лаборатории междисциплинарных исследований развития человека, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1711-0447>, e-mail: human.nerpa@gmail.com

******Халаф Шива**, PhD, научный сотрудник Техасского института измерений, оценки и статистики, Университет Хьюстона, Хьюстон, США, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8809-590X>, e-mail: shiva.khalaf@times.uh.edu

*******Григоренко Елена Леонидовна**, PhD, д.п.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории междисциплинарных исследований развития человека, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия; Университет Хьюстона, Хьюстон, США, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9646-4181>, e-mail: elena.grigorenko@times.uh.edu

Благодарность

Авторы благодарят Мэй Тэн за помощь в редакции текста публикации.

Литература

1. Andringa S. et al. Determinants of Success in Native and Non-Native Listening Comprehension: An Individual Differences Approach // *Language Learning*. 2012. № SUPPL. 2 (62). С. 49–78.
2. Armstrong R. et al. Change in receptive vocabulary from childhood to adulthood: associated mental health, education and employment outcomes // *International Journal of Language and Communication Disorders*. 2017.
3. Asimina, Ralli M., Melpomeni S., Alexandra T. Language and Psychosocial Skills of Institutionalized Children in Greece // *The Open Family Studies Journal*. 2017. № 1 (9). С. 76–87.
4. Baker F.B. The basics of item response theory / F.B. Baker, ERIC, 2001. 186 с.
5. Beck I.L., McKeown M.G. Increasing young low-income children’s oral vocabulary repertoires through rich and focused instruction // *Elementary School Journal*. 2007. № 3 (107). С. 251–271.



6. Bent T. et al. Individual differences in the perception of regional, nonnative, and disordered speech varieties // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2016. № 5 (140). С. 3775–3786.
7. Beverly B.L., McGuinness T.M., Blanton D.J. Communication and academic challenges in early adolescence for children who have been adopted from the former Soviet Union // *Language, Speech, and Hearing Services in Schools*. 2008. № 3 (39). С. 303–313.
8. Biemiller A., Slonim N. Estimating root word vocabulary growth in normative and advantaged populations: Evidence for a common sequence of vocabulary acquisition // *Journal of Educational Psychology*. 2001.
9. Bock R.D., Aitkin M. Marginal maximum likelihood estimation of item parameters: Application of an EM algorithm // *Psychometrika*. 1981. № 4 (46). С. 443–459.
10. Carrow-Woolfolk E. *Comprehensive Assessment of Spoken Language—Second Edition (CASL-2)*. Torrance, CA: Western Psychological Services, 2017.
11. Chalmers R.P. Mirt: A multidimensional item response theory package for the R environment // *Journal of Statistical Software*. 2012. № 6 (48).
12. Chalmers R.P., Counsell A., Flora D.B. It Might Not Make a Big DIF: Improved Differential Test Functioning Statistics That Account for Sampling Variability // *Educational and Psychological Measurement*. 2016. № 1 (76). С. 114–140.
13. Cunningham A.E., Stanovich K.E. What Reading Does for the Mind // *American Educator*. 1998. № 1 (22). С. 137–149.
14. Desmarais C. et al. Sentence comprehension in postinstitutionalized school-age children // *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2012. № 1 (55). С. 45–54.
15. Drasgow F., Lissak R.I. Modified parallel analysis: A procedure for examining the latent dimensionality of dichotomously scored item responses. // *Journal of Applied Psychology*. 1983.
16. Dunn D.M. *Peabody picture vocabulary test-fifth edition*. Bloomington, MN.: Pearson, 2019.
17. Embretson S.E., Reise S.P. *Item response theory for psychologists* Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 2000.
18. Fernald A., Marchman V.A., Weisleder A. SES differences in language processing skill and vocabulary are evident at 18 months // *Developmental Science*. 2013.
19. Fromkin V. et al. The development of language in genie: a case of language acquisition beyond the “critical period” // *Brain and Language*. 1974. № 1 (1). С. 81–107.
20. Gindis B. Cognitive, Language, and Educational Issues of Children Adopted from Overseas Orphanages // *Journal of Cognitive Education and Psychology*. 2005. № 3 (4). С. 291–315.
21. Glennen S., Bright B.J. Five years later: Language in school-age internationally adopted children // *Seminars in Speech and Language*. 2005. Т. 26. № 1. 86–101 с.
22. Goulden R., Nation P., Read J. How large can a receptive vocabulary be? // *Applied Linguistics*. 1990. № 4 (11). С. 341–363.
23. Greenough W.T., Black J.E., Wallace C.S. Experience and brain development. // *Child development*. 1987. № 3 (58). С. 539–559.
24. Hammill D.D. et al. *TOAL-4: Test of Adolescent and Adult Language—Fourth Edition* // 2007.
25. Hart B., Risley T.R. Meaningful differences in the everyday experience of young American children. / B. Hart, T.R. Risley, Paul H Brookes Publishing, 1995.
26. Hart B., Risley T.R. The early catastrophe: The 30 million word gap by age 3 // *American educator*. 2003. № 1 (27). С. 4–9.
27. Hemphill L., Tivnan T. The Importance of Early Vocabulary for Literacy Achievement in High-Poverty Schools // *Journal of Education for Students Placed at Risk (JESPAR)*. 2008. № 4 (13). С. 426–451.
28. Hiebert E.H., Kamil M.L. *Teaching and learning vocabulary: Bringing research to practice* Routledge, 2005. 1–279 с.



29. Horn J.L. A rationale and test for the number of factors in factor analysis // *Psychometrika*. 1965. № 2 (30). C. 179–185.
30. Hu L.T., Bentler P.M. Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives // *Structural Equation Modeling*. 1999. № 1 (6). C. 1–55.
31. Ivanova M. et al. AutoRAT at your fingertips: Introducing the new Russian Aphasia Test on a tablet // *Frontiers in Psychology*. 2016. (7).
32. Janse E., Jesse A. Working memory affects older adults' use of context in spoken-word recognition // *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. 2014. № 9 (67). C. 1842–1862.
33. Johnson M.S. Marginal maximum likelihood estimation of item response models in R // *Journal of Statistical Software*. 2007. № 10 (20). C. 1–24.
34. Kamata A., Bauer D.J. A note on the relation between factor analytic and item response theory models // *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*. 2008. № 1 (15). C. 136–153.
35. Kornilov S.A. et al. Language Outcomes in Adults with a History of Institutionalization: Behavioral and Neurophysiological Characterization // *Scientific Reports*. 2019. № 1 (9). C. 4252.
36. Langer M.M. et al. Item response theory detected differential item functioning between healthy and ill children in quality-of-life measures // *Journal of Clinical Epidemiology*. 2008. № 3 (61). C. 268–276.
37. Linden W.J. van der Handbook of item response theory CRC Press, 2016. 1–595 c.
38. Loman M.M. et al. Postinstitutionalized children's development: Growth, cognitive, and language outcomes // *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics*. 2009. № 5 (30). C. 426–434.
39. Lord F.M. Applications of item response theory to practical testing problems Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1980. 1–274 c.
40. Magis D. et al. A general framework and an R package for the detection of dichotomous differential item functioning // *Behavior Research Methods*. 2010. № 3 (42). C. 847–862.
41. Martinková P. et al. Checking equity: Why differential item functioning analysis should be a routine part of developing conceptual assessments // *CBE Life Sciences Education*. 2017. № 2 (16). C. rm2.
42. Mayberry R.I. Cognitive development in deaf children: The interface of language and perception in neuropsychology // *Handbook of Neuropsychology*. 2002. № Part II (8). C. 71–107.
43. McDermott J. et al. Psychosocial deprivation, executive functions, and the emergence of socio-emotional behavior problems // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2013. T. 7. 167 c.
44. McGregor K.K. et al. Children with developmental language impairment have vocabulary deficits characterized by limited breadth and depth // *International Journal of Language and Communication Disorders*. 2013. № 3 (48). C. 307–319.
45. Merz E.C., McCall R.B., Wright A.J. Attention and language as mediators of academic outcomes following early psychosocial deprivation // *International Journal of Behavioral Development*. 2013. № 5 (37). C. 451–459.
46. Milton J., Treffers-Daller J. Vocabulary size revisited: The link between vocabulary size and academic achievement // *Applied Linguistics Review*. 2013.
47. Muhamedrahimov R.J. et al. Structural characteristics of the institutional environment for young children // *Psychology in Russia: State of the Art*. 2016.
48. Nation K. Lexical learning and lexical processing in children with developmental language impairments // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2014. T. 369. № 1634. 20120387 c.
49. National Reading Panel Teaching children to read: An evidence-based assessment of the scientific research literature on reading and its implications for reading instruction // NIH Publication No. 00-4769. 2000.
50. Paek I., Cole K. Using R for Item Response Theory Model Applications / I. Paek, K. Cole, Routledge, 2019.



51. Quinn J.M., Wagner R.K. Using Meta-analytic Structural Equation Modeling to Study Developmental Change in Relations Between Language and Literacy // *Child Development*. 2018. № 6 (89). С. 1956–1969.
52. R Core Team (2019) R: A language and environment for statistical computing. // Accessed 1st April 2019. 2019.
53. Raju N.S. The area between two item characteristic curves // *Psychometrika*. 1988. № 4 (53). С. 495–502.
54. Reise S.P., Henson J.M. A discussion of modern versus traditional psychometrics as applied to personality assessment scales // *Journal of personality assessment*. 2003. № 2 (81). С. 93–103.
55. Richland L.E., Burchinal M.R. Early Executive Function Predicts Reasoning Development // *Psychological Science*. 2012. № 1 (24). С. 87–92.
56. Rizopoulos D. Irm: An R package for latent variable modeling and item response theory analyses // *Journal of Statistical Software*. 2006. № 5 (17). С. 1–25.
57. Rodríguez-Aranda C., Jakobsen M. Differential contribution of cognitive and psychomotor functions to the age-related slowing of speech production // *Journal of the International Neuropsychological Society*. 2011. № 5 (17). С. 807–821.
58. Scott K.A., Roberts J.A., Glennen S. How well do children who are internationally adopted acquire language? a meta-analysis // *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2011. № 4 (54). С. 1153–1169.
59. Shao Z. et al. What do verbal fluency tasks measure? Predictors of verbal fluency performance in older adults // *Frontiers in Psychology*. 2014. № JUL (5). С. 772.
60. Stahl S.A., Fairbanks M.M. The Effects of Vocabulary Instruction: A Model-Based Meta-Analysis // *Review of Educational Research*. 1986.
61. Steinberg L., Thissen D. Item response theory. *Oxford library of psychology*. / New York, NY, US: Oxford University Press, 2013. 336–373 c.
62. Takane Y., Leeuw J. De On the relationship between item response theory and factor analysis of discretized variables // *Psychometrika*. 1987. № 3 (52). С. 393–408.
63. Tirella L.G. et al. Time use in Russian Baby Homes // *Child: Care, Health and Development*. 2008.
64. Unsworth N., Spillers G.J., Brewer G.A. Variation in verbal fluency: A latent variable analysis of clustering, switching, and overall performance // *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. 2011. № 3 (64). С. 447–466.
65. Wechsler D. Wechsler adult intelligence scale—Fourth Edition (WAIS—IV). San Antonio, TX: Pearson, 2008.
66. Wechsler D. Wechsler intelligence scale for children—Fifth Edition (WISC—V) Bloomington, MN: Pearson, 2014.
67. Widhianto W., Haryanta Examining method effect of synonym and antonym test in verbal abilities measure // *Europe’s Journal of Psychology*. 2015.
68. Wiig E.H., Secord W.A., Semel E. Clinical evaluation of language fundamentals: CELF-5 Bloomington, MN: Pearson, 2013.
69. Williams K. Expressive vocabulary test, third edition. Bloomington, MN: Pearson, 2018.
70. Windsor J. et al. Language acquisition with limited input: Romanian institution and foster care // *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2007. № 5 (50). С. 1365–1381.
71. Windsor J. et al. Effect of foster care on young children’s language learning // *Child Development*. 2011. № 4 (82). С. 1040–1046.
72. Windsor J. et al. Effect of foster care on language learning at eight years: Findings from the Bucharest early intervention project // *Journal of Child Language*. 2013. № 3 (40). С. 605–627.



73. Yap M.J. et al. Individual differences in visual word recognition: Insights from the English Lexicon Project // *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 2012. № 1 (38). С. 53–79.
74. Zanon C. et al. An application of item response theory to psychological test development // *Psicologia: Reflexão e Crítica*. 2016. № 1 (29). С. 1–10.
75. Прихода Н.А. Оценка развития русского языка (ОРРЯ) как стандартизованная методика диагностики коммуникативной функции у детей от 3 до 9 лет // *Психологическая наука и образование*. 2016. № 3 (21). С. 25–33.

Дополнительный электронный материал

Ниже приведена ссылка на дополнительный электронный материал.

1. <https://mfr.osf.io/render?url=https%3A%2F%2Fosf.io%2F93hdx%2Fdownload>

Исследование влияния различных факторов на число пострадавших в дорожно-транспортных происшествиях с помощью методов регрессионного анализа

Горяинов А.В. *

ФГБОУ ВО МАИ (НИУ), Москва, Россия,
e-mail: agoryainov@gmail.com

Поляков Е.А. **

ФГБОУ ВО МАИ (НИУ), Москва, Россия,
e-mail: polyakovevgeny96@mail.ru

В работе рассматриваются зависимости суммарного числа погибших и раненых от различных характеристик ДТП и построение моделей оценки числа погибших и раненых.

Ключевые слова: множественная регрессия, метод наименьших квадратов, дорожно-транспортное происшествие.

Для цитаты:

Горяинов А.В., Поляков Е.А. Исследование влияния различных факторов на число пострадавших в дорожно-транспортных происшествиях с помощью методов регрессионного анализа // Моделирование и анализ данных. 2020. Том 10. № 1. С. 64–74. DOI: 10.17759/mda.2020100103

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование факторов, приводящих к гибели и ранению людей в ДТП является актуальной темой так, как только за первое полугодие 2019 года на территории Москвы зарегистрировано более 4,7 тыс. дорожно-транспортных происшествий, в результате которых погиб 231 человек, более 5,9 тыс. человек получили ранения. Работа посвящена анализу зависимости суммарного числа погибших и раненых в ДТП от различных факторов – характеристик, описывающих, при каких обстоятельствах произошло ДТП.

***Горяинов Александр Владимирович**, кандидат физико-математических наук, доцент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)), Москва, Россия, e-mail: agoryainov@gmail.com

****Поляков Евгений Андреевич**, бакалавр прикладной математики, студент магистратуры, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)), Москва, Россия, e-mail: polyakovevgeny96@mail.ru



Целью исследования является определение характеристик, наиболее сильно влияющих на число пострадавших в ДТП, и построение модели зависимости числа пострадавших от этих характеристик. Предполагается с помощью метода наименьших квадратов найти оценки неизвестных параметров в множественной модели регрессии и на основе построенной модели провести анализ факторов, сильнее всего способствующих гибели и ранению людей при ДТП.

2. СБОР ДАННЫХ

Рассмотрены ДТП, информация о которых была предоставлена центром городских проектов «Штаб». Была получена таблица с данными о 732-х ДТП, произошедших в Москве за август 2019 года. Характеристики ДТП являются как количественными, так и номинальными. В табл. 1 приведено описание всех известных характеристик.

Таблица 1

Характеристики ДТП

Параметр	Описание	Вид характеристики
Time	время	Количественная
DTP_V	вид дтп	Номинальная. Таблица 2.
POG	погибшие	Количественная
RAN	раненые	Количественная
osv	освещение	Номинальная. Таблица 3.
velo	был ли среди участников велосипедист	Бинарная
moto	был ли среди участников мотоциклист	Бинарная
days_of_week	день недели	Номинальная
kids	был ли среди участников ребенок	Бинарная
public_tr	был ли среди транспортных средств общественный транспорт	Бинарная
truck	был ли среди транспортных средств грузовой транспорт	Бинарная
road_quality	выявленные недостатки содержания дорог	Номинальная. Таблица 4
location	место дтп	Номинальная. Таблица 5
weather	погода	Номинальная. Таблица 6
alco	находился ли водитель в состоянии алкогольного опьянения	Бинарная
dr_viol	нарушения водителей	Номинальная. Таблица 7
ped_viol	нарушения пешеходов	Номинальная. Табл. 8
tr_c	количество транспортных средств	Количественная
ptpnt_c	количество участников	Количественная
date	будний/выходной	Бинарная
District	Удалённость от центра	Порядковая. Районы разделены на четыре группы по удаленности от центра Москвы.



Бинарные признаки кодировались числами 1 (присутствует) и 0 (отсутствует). При кодировании числами номинальных характеристик был осуществлён переход от номинальной шкалы к порядковой: градации характеристик были на основе экспертных оценок упорядочены по степени опасности для жизни участников ДТП. Результат кодирования числами номинальных характеристик приведён в табл. 2 – 8.

Таблица 2

Значения характеристики «Вид ДТП»

Вид ДТП	Код
Не определено или иной вид ДТП	-1
Возгорание вследствие технической неисправности движущегося или остановившегося ТС, участвующего в дорожном движении.	1
Падение пассажира	2
Наезд на велосипедиста	3
Наезд на пешехода	4
Опрокидывание	5
Столкновение	6
Наезд на препятствие	7
Наезд на стоящее ТС	8

Таблица 3

Значения характеристики «Освещение»

Освещение	Код
Не определено	-1
Светлое время суток	0
В темное время суток, освещение включено	1
Сумерки	2
В темное время суток, освещение отсутствует	3

Таблица 4

Значения характеристики «Выявленные недостатки содержания дорог»

Выявленные недостатки содержания дорог	Код
Не установлены	0
Дефекты покрытия	1
Отсутствие, плохая различимость горизонтальной разметки проезжей части	2
Неисправность светофора	3
Неисправное освещение	4
Отсутствие пешеходных ограждений в необходимых местах	5
Отсутствие дорожных ограждений в необходимых местах	6
Сужение проезжей части; наличие препятствий, затрудняющих движение транспортных средств	7
Отсутствие дорожных знаков в необходимых местах, отсутствие временных ТСОД в местах проведения работ	8
Неправильное применение, плохая видимость дорожных знаков	9
Отсутствие, плохая различимость вертикальной разметки	10



Таблица 5

Значения характеристики «Место ДТП»

Место ДТП	Код
Не определено или иное место	-1
Автостоянка, отделенная от проезжей части	1
Перегон (нет объектов на месте ДТП)	2
Подход к мосту, эстакаде, путепроводу	3
Мост, эстакада, путепровод, тоннель	4
Регулируемый пешеходный переход	5
Нерегулируемый пешеходный переход	6
Регулируемый перекресток	7
Нерегулируемый перекресток неравнозначных улиц или дорог, автостоянка, не отделенная от проезжей части, выезд с прилегающей территории	8
Внутридворовая территория, пешеходная зона, тротуар, пешеходная дорожка	9
Остановка общественного транспорта	10

Таблица 6

Значения характеристики «Погода»

Погода	Код
Не определено	-1
Ясно	0
Пасмурно	1
Дождь	2
Туман	3
Пасмурно и Дождь	4

Таблица 7

Значения характеристики «Нарушения водителей»

Нарушения водителей	Код
Не определено	-1
Нарушения ПДД велосипедистом	1
Нарушение правил остановки	2
Нарушение правил погрузки, выгрузки и крепления грузов	3
Нарушение правил проезда остановок трамвая	4
Нарушение требований дорожных знаков	5
Несоблюдение условий, разрешающих движение транспорта задним ходом	6
Эксплуатация ТС с техническими неисправностями, при которых запрещается их эксплуатация	7
Нарушения правил перевозки пассажиров	8



Нарушения водителей	Код
Нарушение правил проезда пешеходного перехода	9
Нарушение правил пользования общественным транспортом	10
Несоблюдение очередности проезда перекрестков	11
Неправильный выбор дистанции	12
Несоблюдение бокового интервала	13
Другие нарушения ПДД водителем	14
Нарушение правил перестроения или обгона	15
Нарушение правил расположения ТС на проезжей части	16
Несоответствие скорости конкретным условиям движения, превышение установленной скорости движения	17
Нарушение требований линий разметки	18
Нарушение требований сигналов светофора	19
Выезд на полосу встречного движения, выезд на полосу встречного движения с разворотом, поворотом налево или объездом препятствия	20

Таблица 8

Значения характеристики «Нарушения пешеходов»

Нарушения пешеходов	Код
Не определено	-1
Переход через проезжую часть вне пешеходного перехода в зоне его видимости либо при наличии в непосредственной близости подземного надземного пешеходного перехода	1
Иные нарушения	2
Неожиданный выход из-за сооружений деревьев	3
Нахождение на проезжей части без цели её перехода	4
Переход через проезжую часть в неустановленном месте при наличии в зоне видимости перекрёстка	5
Переход проезжей части в запрещённом месте оборудованном пешеходными ограждениями	6
Неподчинение сигналам регулирования	7
Движение вдоль проезжей части при наличии и удовлетворительном состоянии тротуара	8
Неожиданный выход из-за стоящего ТС	9
Движение вдоль проезжей части попутного направления вне населенного пункта при удовлетворительном состоянии обочины	10

3. ОБЗОР ИСТОЧНИКОВ

Очевидно, что помимо характеристик, представленных в таблице 1, на число погибших и раненых в ДТП влияют также и другие факторы. В их числе в работах [3], [4], [6] посвящённых анализу причин гибели и ранения людей в ДТП, называются

техническое состояние автомобиля, переход дорог пешеходами в состоянии алкогольного опьянения, не использование ремней безопасности, близость медицинских учреждений к месту ДТП и др. Многие из этих характеристик требуют более подробного изучения, и их выяснение – трудоемкий процесс.

4. АНАЛИЗ ДАННЫХ

Расчеты в работе проведены в программной среде SPSS.

Множественная регрессия является расширением простой линейной регрессии. С помощью простой регрессии оценивалась степень влияния одной независимой переменной (предиктора) на зависимую переменную (критерий). В отличие от простой регрессии ($Y = \beta_0 + \beta_1 X_1$), множественная регрессия исследует влияние двух и более предикторов на критерий ($Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n$).

Применение множественной регрессии позволяет исследователю ответить на вопрос, насколько хорошо оцененное уравнение аппроксимирует данные, есть ли значимая линейная связь, а также каковы оцененные значения коэффициентов для уравнения наилучшего предсказания. Кроме того, может быть определена относительная важность независимых переменных в предсказании зависимой переменной.

Рассмотрим множественную модель регрессии:

$$\begin{aligned}
 SUM_i = & \beta_0 + \beta_1 DTP_V_i + \beta_2 Time_i + \beta_3 osv_i + \beta_4 velo_i + \beta_5 moto_i \\
 & + \beta_6 days_of_week_i + \beta_7 kids_i + \beta_8 public_tr_i + \beta_9 truck_i \\
 & + \beta_{10} road_quality_i + \beta_{11} location_i + \beta_{12} weather_i + \beta_{13} alco_i \\
 & + \beta_{14} dr_viol_i + \beta_{15} ped_viol_i + \beta_{16} tr_c_i + \beta_{17} ptpnt_c_i \\
 & + \beta_{18} District_i + \beta_{19} date_i + \varepsilon_i
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$i=1, \dots, N,$$

Где N – число ДТП, ε_i независимые и одинаково распределённые случайные величины.

С помощью $\beta_0 \dots \beta_{19}$ метода наименьших квадратов были найдены оценки неизвестных параметров которые представлены во втором столбце таблицы 9. В третьем столбце представлены средние квадратические отклонения соответствующих оценок.

Таблица 9

Результаты оценивания параметров модели (1)

Переменная	β	СКО	t	p
Константа	-0,412	0,124	-3,311	0,001
date	0,019	0,040	0,460	0,645
Time	-0,013	0,020	-0,646	0,519
District	-0,006	0,017	-0,351	0,726
DTP_V	0,111	0,017	6,492	0,000
osv	0,057	0,039	1,487	0,137



Переменная	β	СКО	t	p
velo	0,658	0,102	6,465	0,000
moto	0,247	0,053	4,655	0,000
days_of_week	0,004	0,009	0,441	0,659
kids	-0,099	0,061	-1,606	0,109
public_tr	0,013	0,069	0,185	0,853
truck	0,162	0,059	2,757	0,006
road_quality	0,000	0,008	0,052	0,959
location	-0,002	0,006	-0,259	0,796
weather	0,017	0,030	0,552	0,581
alco	0,027	0,145	0,183	0,855
dr_viol	0,012	0,004	3,092	0,002
ped_viol	-0,011	0,012	-0,843	0,399
tr_c	-0,664	0,031	-21,632	0,000
ptpnt_c	0,819	0,020	41,229	0,000

β – оценки коэффициентов регрессионного уравнения;

СКО – среднее квадратическое отклонения оценки;

t – эмпирическое значение t -критерия для проверки гипотезы о статистической значимости соответствующего коэффициента;

p – p -значение для проверки гипотезы о статистической значимости соответствующего коэффициента (вероятность ошибочного принятия гипотезы о существовании ненулевых коэффициентов регрессии).

Таблица 10

Сводка для модели (1)

R^2	Скорректированный R^2	СКО	Дарбин-Уотсон
0,743	0,736	0,466	1,931

Коэффициент множественной детерминации R^2 составляет 0,743, что говорит, о том, что 74,3% дисперсии зависимой переменной объясняется влиянием независимой переменной (чем ближе R^2 к 1, тем лучше построенная нами модель). Такое значение говорит о том, что модель учитывает большую часть факторов влияющих на число пострадавших в ДТП.

Стандартная ошибка оценки зависимой переменной 0,466.

Значение статистики Дарбина-Уотсона не выходит за границы [1,5;2,5], поэтому можно говорить о том, что автокорреляции нет.

Таблица 11

Дисперсионный анализ для модели (1)

	Сумма квадратов	ст. св.	Средний квадрат	F	Значимость
Регрессия	447,579	19	23,557	108,551	0,000
Остаток	154,729	713	0,217		
Всего	602,308	732			



Таблица 10 показывает суммы квадратов отклонений, значение статистики F -критерия Фишера, p -значение для Критерия Фишера, по которому можно судить о достоверности построенной связи переменных.

После исключения статистически незначимых характеристик (*days_of_week*, *road_quality*, *district*, *alco*, *date*, *public_tr*, *weather*, *location*, *time*) была построена новая модель регрессии с меньшим количеством переменных. Исключение переменных проводилось по одному и в зависимости от поведения скорректированного коэффициента детерминации были приняты решения о том, исключать переменную или нет. В итоге была получена следующая модель:

$$\begin{aligned}
 SUM_i = & \beta_0 + \beta_1 DTP_V_i + \beta_2 osv_i + \beta_3 velo_i + \beta_4 moto_i + \beta_5 kids_i \\
 & + \beta_6 truck_i + \beta_7 dr_viol_i + \beta_8 ped_viol_i + \beta_9 tr_c_i + \beta_{10} ptpnt_c_i \quad (2) \\
 & + \varepsilon_i, i = 1, \dots, N,
 \end{aligned}$$

Таблица 12

Результаты оценивания параметров модели (2)

Переменная	β	СКО	t	p
Константа	-0,421	0,077	-5,446	0,000
DTP_V	0,112	0,015	7,267	0,000
osv	0,073	0,034	2,178	0,030
velo	0,658	0,099	6,626	0,000
moto	0,242	0,052	4,676	0,000
kids	-0,101	0,060	-1,673	0,095
truck	0,163	0,058	2,819	0,005
dr_viol	0,012	0,004	3,112	0,002
tr_c	-0,665	0,030	-22,109	0,000
ptpnt_c	0,822	0,019	43,131	0,000
ped_viol	-0,010	0,012	-0,841	0,400

Таблица 13

Сводка для модели (2)

R^2	Скорректированный R^2	СКО	Дарбин-Уотсон
0,743	0,739	0,463	1,926

Таблица 14

Дисперсионный анализ для модели (2)

	Сумма квадратов	ст. св.	Средний квадрат	F	Значимость
Регрессия	447,229	10	44,723	208,215	0,000
Остаток	155,080	722	0,215		
Всего	602,308	732			



Коэффициент детерминации в новой модели практически не изменился, что подтверждает оправданность исключения девяти объясняющих переменных из модели. Таким образом можно сделать вывод о незначимости влияния на число пострадавших в ДТП календарной даты, дня недели, времени дня, качества дорожного покрытия, удалённости от центра города и погоды.

Из гистограммы стандартизированных остатков, приведённой на рисунке 1, можно сделать вывод об отсутствии выбросов и оправданности применения метода наименьших квадратов.

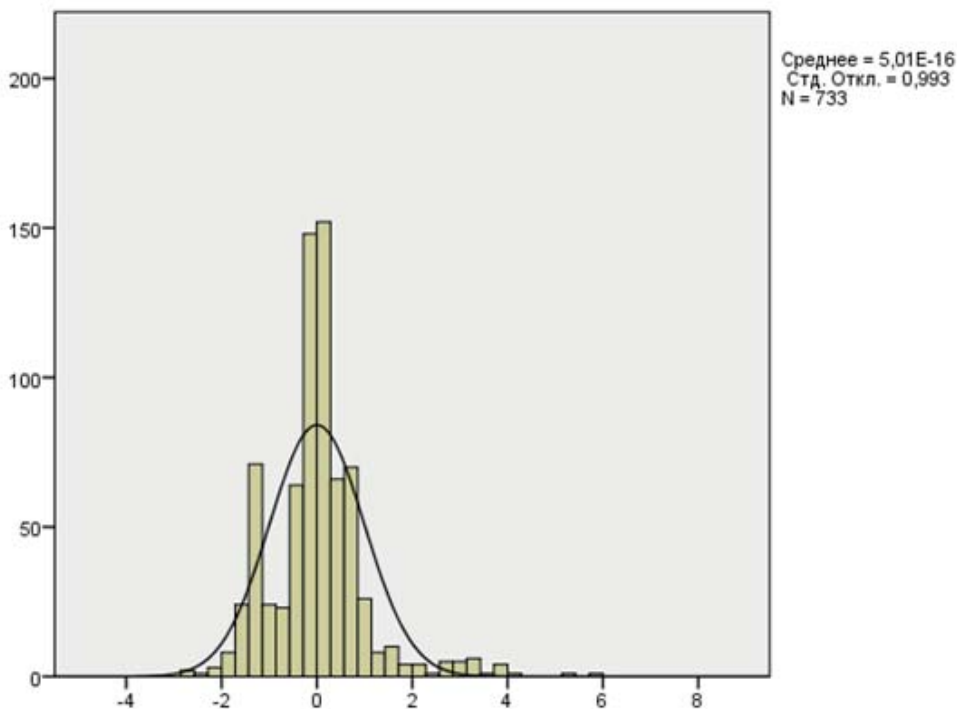


Рис.1. Гистограмма стандартизированных остатков

График $P-P$ стандартизированных остатков, приведённый на рисунке 2, также говорит в пользу предположения о нормальном распределении остатков. При нормальном распределении график представляет собой прямую $y = x$, наблюдаемый график достаточно слабо отклоняется от неё.

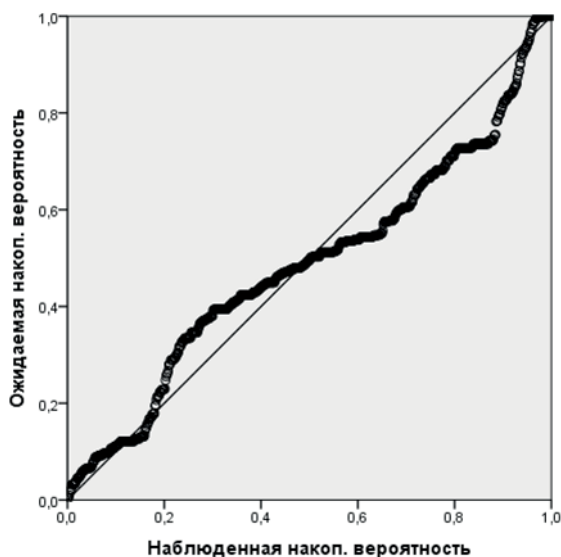


Рис.2. График P-P стандартизованных остатков

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе методами регрессионного анализа было проанализировано влияние документально фиксируемых характеристик ДТП на количество погибших и раненых в результате происшествия. С одной стороны, исследование показало, что некоторые характеристики значимо не влияют на количество пострадавших. С другой стороны, можно сделать вывод о том, что имеющихся в отчётах о происшествиях характеристик недостаточно для приемлемо полного объяснения всех причин гибели и ранения людей при ДТП. Для выяснения и документальной фиксации неучтённых в исследовании факторов необходимы дополнительные исследования.

Литература

1. Горяинова Е.Р., Панков А.Р., Платонов Е.Н. Прикладные методы анализа статистических данных: учеб. пособие; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2012.
2. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии. М.: Финансы и статистика, 1981.
3. Есина М.Г., Лобова А.А., Хонгорова О.В., Шарабанова И.Ю. Статистический анализ дорожно-транспортных происшествий как сферы общественных отношений // Russian Journal of Education and Psychology. 2017. №6-2.
4. Махова О.А. Теоретические вопросы прикладного анализа смертности из-за ДТП // Статистика и экономика. 2014. №6.
5. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. – М.: Мир, 1980.
6. Фаттахов Т.А. Дорожно-транспортный травматизм в России и его факторы // Социальные аспекты здоровья населения. 2015. №4.



Study of the Influence of Various Factors on the Number of Victims in Road Accidents Using Regression Analysis Methods

Goryainov A.V.*

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia,
e-mail: agoryainov@gmail.com

Polyakov E.A.**

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia,
e-mail: polyakovevgeny96@mail.ru

In the paper is considered the dependence of the total number of dead and injured on various characteristics of the accident and the construction of models for estimating the total number of dead and injured.

Keywords: multiple regression, least squares method, traffic accident.

For citation:

Goryainov A.V., Polyakov E.A. Study of the Influence of Various Factors on the Number of Victims in Road Accidents Using Regression Analysis Methods. *Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis*, 2020. Vol. 10, no. 1, pp. 64–74. DOI: 10.17759/mda.2020100103 (In Russ., abstr. In Engl.)

References

1. Goryainova E.R., Pankov A.R., Platonov E.N. Applied Methods of Statistical Data Analysis (Prikladnye metody analiza statisticheskikh dannykh); National Research University “Higher School of Economics”. M.: Publishing house of the Higher School of Economics, 2012.
7. Demidenko E.Z. Linear and Nonlinear Regression (Lineynaya i Nelineynaya Regressii). M.: Finansy i statistika, 1981.
8. Esina M.G., Lobova A.A., Khongorova O.V., Sharabanova I.Yu. Statistical Analysis of Traffic Accidents as a Sphere of Public Relations (Statisticheskii Analiz Dorozhno-Transportnykh Proisshestviy Kak Sfery Obshhestvennykh Otnosheniy). Russian Journal of Education and Psychology. 2017. №6-2.
9. Makhova O.A. Theoretical Aspects of Applied Analysis of Deaths in Traffic Accidents (Teoreticheskie Voprosy Prikladnogo Analiza Amernosti iz-za DTP). Statistika i ekonomika. 2014. №6.
10. Seber Dzh. Linear Regression Analysis (Lineynyi Regressionnyi Analiz). M.: Mir, 1980.
11. Fattakhov T.A. Traffic Traumatism in Russia and its Factors (Dorozhno-transportnyi travmatizm v Rossii i ego faktory). Socialnye aspekty zdorovya naseleniya. 2015. №4.

***Goryainov Alexander Vladimirovich**, PhD (physics-mathematics), associate professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, e-mail: agoryainov@gmail.com

****Polyakov Evgeny Andreevich**, bachelor of applied mathematics, master’s degree student, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, e-mail: polyakovevgeny96@mail.ru

Исследование игровой активности на смартфонах

Жаркова О.Г.*

ФГБОУ ВО МГППУ, Москва, Россия,
e-mail: olga.milk.13@yandex.ru

Барболина С.А.**

ФГБОУ ВО МГППУ, Москва, Россия,
e-mail: viplanastar@mail.ru

Афонина Н.М.***

ФГБОУ ВО МГППУ, Москва, Россия,
e-mail: anyafler@mail.ru

Волкова В.Н.****

ФГБОУ ВО МГППУ, Москва, Россия,
e-mail: valuha160@mail.ru

В данной статье рассказывается об исследовании игровой активности на смартфонах, проведённом в 2019–2020 году. В исследовании приняли участие больше 200 человек разных возрастов от 4 до 72 лет. Участники отвечали на вопросы об их игровой деятельности на смартфонах. Разработанный опросник автоматизирован с помощью Google Forms и содержит 8 вопросов: о возрасте, половой принадлежности, причине начала игровой активности, причине...

Для цитаты:

Жаркова О.Г., Барболина С.А., Афонина Н.М., Волкова В.Н. Исследование игровой активности на смартфонах // Моделирование и анализ данных. 2020. Том 10. № 1. С. 75–85.
DOI: 10.17759/mda.2020100104

**Жаркова Ольга Геннадьевна*, студент магистратуры, Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), Москва, Россия, e-mail: olga.milk.13@yandex.ru

***Барболина Светлана Александровна*, студент магистратуры, Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), Москва, Россия, e-mail: viplanastar@mail.ru

****Афонина Наталья Максимовна*, студент магистратуры, Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), Москва, Россия, e-mail: anyafler@mail.ru

*****Волкова Валентина Николаевна*, студент магистратуры, Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), Москва, Россия, e-mail: valuha160@mail.ru



продолжения игровой активности, предпочитаемых жанрах, затрачиваемом времени на игры каждый день, использование онлайн игр и наличие трат на мобильные игры. Собранные данные помогли выявить мотивы начала и продолжения игровой активности на смартфонах. В ходе исследования были проанализированы мобильные игры на платформах iOS и Android. Анализ собранных данных показал, что существуют взаимосвязи между жанрами. Люди, предпочитающие определенный жанр, имеют склонность выбирать похожие жанры игр. Выявлена зависимость покупок в онлайн играх от возраста и времени, проводимого в играх каждый день. Чем старше люди и чем больше проводят времени в играх каждый день, тем они охотнее тратят деньги в играх. Половая принадлежность не влияет на игровую активность. Выбор определенных жанров игр не связан с возрастом. Такие выводы были сделаны в проведенном исследовании игровой активности на смартфонах.

Ключевые слова: смартфон, мобильные игры, игры, жанры, исследование, возраст, зависимость, мотив, вопрос, выборка.

1. ВВЕДЕНИЕ

В связи с нарастающей популярностью мобильных игр и их вторжением в повседневную жизнь огромного количества людей возникает необходимость изучения игровой активности людей разных возрастов и выявление мотивов, побуждающих играть на смартфонах. Сейчас игры на смартфонах популярны настолько, что в них играют люди всех возрастов, и делают они это довольно часто. Люди играют в транспорте, по дороге на работу и в перерывах; играют, чтобы развлечься, отдохнуть или развеять скуку. Согласно результатам исследования ВЦИОМ, проведенному в 2015 году, каждый второй российский интернет-пользователь для выхода в интернет-сеть пользуется смартфоном, 55 % используют смартфон как основное устройства для выхода в интернет [1].

Смартфон (мобильный телефон), как правило, имеет сенсорный экран и обладает функциональностью карманного персонального компьютера, который позволяет всегда, при наличии интернета или СИМ-карты, оставаться на связи и получать разнообразную информацию о событиях в мире.

Смартфоны стали неотъемлемой частью жизни многих людей. Появилось такое понятие как «смарт-зависимость». Проведенное в 2017 году исследование «Феномен смартфоновых зомби (СМОМБИ)», проведенное в Санкт Петербурге Белокрепничкой П.А. и Балашовой К.А., показало, что количество смартфонозависимых людей растет. Однако 60 % опрошенных в данном исследовании не считают себя зависимыми от интернета и смартфонов. В результате было выяснено, что респонденты довольно много времени проводят в интернете, а 35 % практически не выходят из него. И как следствие, многие (около 40 %) проводят больше времени в Интернете, чем предполагают изначально. К тому же 60 % респондентов не высыпается, так как засиживается в сети допоздна [2].



Мобильные игры – самый быстрорастущий сегмент игрового рынка. В 2018 году на них пришлось 74 % всех расходов пользователей мобильных приложений. Игры по-прежнему уверенно занимают первое место по выручке и загрузкам в магазинах приложений на смартфонах iOS и Android [3].

2. ХОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование было разбито на 2 этапа: интервьюирование тестовой выборки и интернет-опрос. Тестовая выборка использовалась для выделения возможных ответов на изначальный список вопросов, в данном исследовании мы именуем их как игровые мотивы. Также тестовая выборка помогла с определением наилучшего формулирования имеющихся вопросов и формированием новых. Тестовая выборка состояла из 30 человек.

На стадии разработки опросник содержал следующие вопросы в свободной форме:

1. сколько вам лет? (возраст)
2. какого вы пола? (пол)
3. Почему начали играть в игры на смартфоне?
4. Почему продолжаете играть/ с какой целью играете сейчас?
5. В какие жанры игр играете?
6. Сколько примерно часов играете каждый день?
7. Играете ли в онлайн игры?
8. Тратите ли деньги на покупки (донат) в мобильных играх?

Преобразованные вопросы с добавлением вариантов ответов использовались для создания опросника в Google Forms. Данная платформа позволяет распространить опросник по ссылке, что облегчает задачу привлечения участников к опросу. Google Forms – это онлайн приложение для администрирования опросов, которое входит в офисный пакет Google Drive.

В исследовании приняли участие 181 респондент без учета тестовой выборки. Все опрошенные являются активными пользователями игр на смартфонах различных жанров. Возраст участников варьируется от 4 до 72 лет. Количество мужчин и женщин, принявших участие в опросе, примерно одинаковое.

3. ИГРОВЫЕ МОТИВЫ

В ходе интервьюирования 30 человек из тестовой выборки удалось выделить группы частых ответов на вопросы о том, как начали играть и почему играют сейчас. Ответы на данные вопросы мы называем «игровыми мотивами» или причиной играть в мобильные игры. Под мотивом подразумевается побуждение к действию. Мотив – соображение, по которому субъект должен действовать – определение Жо Годфруа.

Вопросы, задаваемые тестовой выборке:

Как вы начали играть в мобильные игры?

По какой причине вы продолжаете играть в мобильные игры?



Сколько в среднем времени вы тратите каждый день на мобильные игры?

Ответы респондентов на эти вопросы позволили выделить группы мотивов.

Мотивы начала игровой активности:

1. Совет или прямое приглашение сыграть вместе от друга, родственника, знакомого и т.п.
2. Влияние СМИ (реклама)
3. Интерес к деятельности других людей. Увидел у других и решил попробовать сыграть самостоятельно.
4. Желание развить кругозор и навыки (например, скорость реакции)
5. Развлечение (например, в дороге)
6. Замена настольным играм (замена живого оппонента для настольных игр на искусственный интеллект из игр на смартфоне или онлайн-соперника)
7. Выгода – способ заработка денег.

Мотивы продолжения игровой деятельности:

1. Общение
2. Психологическая невозможность бросить игру (Зависимость)
3. Соревновательный элемент. Желание быть лучшим или входить в список лучших игроков
4. Способ отдыха и развлечения
5. Способ скоротать время в пути
6. Развитие умственных возможностей, моторики и т.д.

Мотив в данном случае рассматривается как синоним слова «причина». Причина начать игровую деятельность впервые, и причина продолжать играть в разные игры на мобильных устройствах.

Выделенные мотивы позволили понять, что часто люди начинали играть с какой-то одной целью, а продолжают уже по другой. Это заставляет задуматься. Некоторые респонденты напрямую в ходе интервьюирования высказали, что у них есть зависимость от игр, и именно поэтому они не могут прекратить играть.

4. ЖАНРЫ ИГР, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ДАННОМ ИССЛЕДОВАНИИ

В ходе доработки опросника выяснилось, что жанры на таких популярных платформах как IOS и Android сильно различаются. Одна и та же игра может быть записана в разные жанры. Между платформами и разработчиками нет никак договоренностей. Некоторые жанры имеют названия, не отображающие действительность, что затрудняет сопоставление игр с жанрами.

Были выделены следующие жанры, представленные в таблице 1, которые было бы интереснее всего анализировать, и найдены соответствующие этим жанрам названия популярных игр. Некоторые жанры в опросе было решено объединить, так как они очень похожи.



Таблица 1

Используемые жанры и примеры игр

Жанр	Примеры игр
Карточные	Дурак, пасьянс, косынка
Головоломки	3 в ряд, sudoku, лабиринт, 2048, тетрис
Поиск предметов	Загадочный дом: поиск предметов
Симуляторы фермы, кафе, города	Зомби ферма, симсити, веселая ферма, моя кофейня
Настольные	Монополия, шахматы, манжонг, домино
Развивающие и обучающие	Разитие мозга, скорочтение, учим языки
Шутеры	Fortnite, cs
Аркады	Doodle jump, drop stack ball, fruit ninja
Викторины	Вопрос ответ, миллионер, интеллект-баттл
Гонки	Hill climb racing, asphalt, need for speed
Азартные (казино)	Рулетка, слоты
Ролевые	Eve, хроники хаоса, диавло
Спортивные	Футбол, теннис, бокс, волейбол
Квесты	Клуб романтики, побег из комнаты
Vr и дополненная реальность	Pockemon go, сафари, горки
Приключения	Воин ниндзя, квестоманьяк
Стратегии	Защита башен, clash of clans
Словесные	Ребусы, анаграммы, кроссворды, найди слово
Музыка	Tiles hop, пианино, guitar hero
ММОРПГ	Lineage 2, sword of chaos
Экшен	Swamp attack, пираты, big hunter
Моба	League of legends
Логические	Эврика, веселые задачки, мастер логики
Файтинги	Бокс, мма, теккен

5. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

В исследовании приняли участие 181 человек: 91 женщина и 90 мужчин. Все опрошенные являются активными пользователями игр на смартфонах. Возраст участников варьируется от 4 до 72 лет. Проверка на нормальность распределения выборки производилась в SPSS по критерию Колмогорова-Смирнова и дала положительный результат. Таким образом, выборка имеет нормальное распределение по полу и возрасту.



Данное исследование показало, что в среднем люди проводят в играх по 3 часа в сутки. Больше всего времени в играх проводят люди, имеющие зависимость от игр и желание соревноваться с другими игроками.

Как начали играть		
1	по совету друзей, родственников	32
2	реклама	39
3	увидел у других	31
4	для развития	13
5	способ занять время	43
6	заменял настольные игры	8
7	заработать	7
8	другое	8

Для чего играют		
1	общение	25
2	сложно перестать играть	13
3	соревновательный элемент	19
4	отдых и расслабление	64
5	провести время	45
6	саморазвитие	10
7	другое	2

Рис. 1. Ответы на вопросы о начале игровой активности и её продолжения

На рисунке 1 представлены 2 таблицы с ответами на вопросы. Левый столбец – это шифр под которым кодировался ответ для последующей обработки, а справа количество людей, давших такой ответ. По ответам видно, что чаще всего люди впервые начинают играть, чтобы занять время (43) или под влиянием рекламных объявлений (39). Продолжают играть, так как игры позволяют людям отдохнуть и расслабиться.

Самым популярным жанром по результатам опроса являются головоломки (84).

В ходе исследования была выявлена зависимость между возрастом и покупками в играх (донатом) и зависимость между временем игры и донатами. Чем больше времени человек проводит в играх, тем охотнее он тратит на них деньги. Более свойственными к тратам в играх являются взрослые люди. Зависимости между половым признаком и донатами не выявлено. Ниже представлена таблица 2 с результатами проведения анализа по выявлению зависимостей между полом, возрастом, временем игры и донатами. Выявление зависимостей производилось по критерию Краскела-Уоллеса в программе для статистической обработки данных SPSS.

Таблица 2

Критерий Краскела-Уоллеса

Ранги			
	донат	N	Средний ранг
возраст	0	106	81,66
	1	76	105,22
	Всего	182	
пол	0	106	92,00
	1	76	90,80
	Всего	182	
время_игры	0	105	77,22
	1	75	109,09
	Всего	180	



Ранги			
Статистики критерия^{а,б}			
	возраст	пол	время_игры
Хи-квадрат	8,875	,030	17,211
ст.св.	1	1	1
Асимпт. знч.	,003	,861	,000
а. Критерий Краскела-Уоллеса			
б. Группирующая переменная: донат			

Зависимостей, связанных с половым признаком, критерием Манна-Уитни не выявлено. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Критерий Манна-Уитни

Ранги				
	пол	N	Средний ранг	Сумма рангов
возраст	0	91	92,23	8392,50
	1	90	89,76	8078,50
	Всего	181		
время_игры	0	89	85,43	7603,00
	1	90	94,52	8507,00
	Всего	179		
онлайн	0	91	84,68	7706,00
	1	90	97,39	8765,00
	Всего	181		
донаты	0	91	91,29	8307,50
	1	90	90,71	8163,50
	Всего	181		
Статистики критерия^а				
	возраст	время_игры	онлайн	донаты
Статистика U Манна-Уитни	3983,500	3598,000	3520,000	4068,500
Статистика W Уилкоксона	8078,500	7603,000	7706,000	8163,500
Z	-,317	-1,203	-2,070	-,088
Асимпт. знч. (двухсторонняя)	,751	,229	,038	,930
а. Группирующая переменная: пол				

Наибольшие трудности в исследовании возникли в связи с анализом предпочтений жанров игры людьми разного возраста. Мы выдвинули 2 гипотезы о том, что люди разных возрастных групп предпочитают игры разных жанров.

Первая гипотеза распространялась на возраст до 30 лет и после 30 лет.

Вторая гипотеза: 1-ая группа от 15 до 29, 2-ая от 30 до 60.

Последующий анализ жанров опроверг эти гипотезы. А значит, предпочтений в жанрах, связанных с возрастом, нет. Хотя часто кажется, что люди разного возраста предпочитают разные жанры.



Интересной задачей стало выявление связи между предпочитаемыми жанрами. Анализ выполнялся с помощью корреляции Спирмена, т.к. жанры не имеют нормального распределения. Небольшая часть таблицы корреляции Спирмена представлена на рисунке 2. Полностью таблицу корреляций можно изучить по ссылке: https://drive.google.com/open?id=1_v_PkPfXWQsrKdkZJGe7iKVbW4LnGxEc.

		головоломки	поиск предметов	симуляторы	настольные и карточные	развивающие и обучающие	шутеры и экшены	аркады и музыкальные	викторины
головоломки	Коэффициент корреляции	1	0,164	0,274	-0,074	0,067	-0,182	0,134	0,276
	Знч. (2-сторон)		0,085	0,003	0,436	0,481	0,054	0,158	0,003
	N	112	112	112	112	112	112	112	112
поиск предметов	Коэффициент корреляции	0,164	1	0,008	-0,073	0,176	0,023	-0,027	0,177
	Знч. (2-сторон)	0,085		0,93	0,445	0,063	0,809	0,777	0,062
	N	112	112	112	112	112	112	112	112
симуляторы	Коэффициент корреляции	0,274	0,008	1	-0,007	-0,122	-0,099	-0,074	0,232
	Знч. (2-сторон)	0,003	0,93		0,941	0,202	0,301	0,436	0,014
	N	112	112	112	112	112	112	112	112
настольные и карточные	Коэффициент корреляции	-0,074	-0,073	-0,007	1	0,086	-0,023	-0,198	0,193
	Знч. (2-сторон)	0,436	0,445	0,941		0,367	0,808	0,036	0,041
	N	112	112	112	112	112	112	112	112

Рис. 2. Часть таблицы корреляций жанров игр на смартфонах

Список положительных корреляций:

- Головоломки – симуляторы, викторины, словесные
 - Настольные и карточные – викторины, квесты
 - Обучающие – викторины
 - Шутеры и экшены – гонки, ролевые, спортивные, мморпг и моба
 - Викторины – головоломки, поиск предметов, настольные и карточные, азартные, развивающие, квесты, словесные
 - Гонки – спортивные, шутеры и экшены
 - VR – аркады
 - Стратегии – ролевые
- Список отрицательных корреляций:
- Настольные и карточные – спортивные, VR
 - Шутеры и экшены – викторины
 - VR – настольные и карточные

О природе данных корреляций судить не просто. Определенно есть закономерности, которые нуждаются в дальнейшем изучении. Люди, зачастую, устанавливают



популярные игры и не интересуются их жанром. А разработчики игр причисляют игры сразу к нескольким жанрам, что усложняет анализ.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование игровой активности на смартфонах является интересной и актуальной задачей. Для сбора данных для анализа была изучена предметная область (проанализированы мобильные игры, предлагаемые на платформах IOS и Android, выделены и разделены жанры).

Сбор данных проводился в форме интервьюирования и онлайн с помощью Google Forms. В исследовании приняли участие 181 респондент.

Выявлено наличие корреляции между жанрами игр на смартфонах. Проведен анализ закономерностей, связанных с покупками в онлайн играх, в ходе которого была выявлена зависимость покупок в онлайн играх от возраста и времени, проводимого в играх каждый день. Анализ, проведенный в данном исследовании, позволил сделать следующие выводы:

- Корреляция между возрастом и донатом положительная, чем старше люди, тем они охотнее тратят деньги в играх.
- Корреляция между временем игры и донатом положительная, чем больше люди ежедневно играют, тем они охотнее тратят деньги на донаты.
- Зависимости между половым признаком, временем игры и донатами не выявлено.
- Выбор определенных жанров игр не связан с возрастом.
- Между жанрами существуют корреляции, например, люди, играющие в головоломки, часто играют в викторины, симуляторы и словесные игры.

Литература

1. ВЦИОМ Интернет: новая эра мобильных устройств. [Электронный ресурс], 2015. Режим доступа: <https://wciom.ru/index.php?id=236&uid=115255/> (Дата обращения: 21.01.2020)
2. Белокреницкая П.А., Балашиова К.А. Феномен смартфоновых зомби (смомби) // Вестник науки и образования. 2019. № 1–1 (55). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fenomen-smartfonovyh-zombi-smombi> (дата обращения: 18.02.2020)
3. Игровой рынок, тренды и прогнозы – большая аналитика от App Annie // Хабр [Электронный ресурс] – URL: <https://habr.com/ru/company/pixonix/blog/443746/> (дата обращения: 20.02.2020)
4. Крухмалева О.В., Крухмалев Е.В. Современные игровые устройства в жизни детей и подростков: социокультурный анализ // Культура и образование: научно-информационный журнал вузов культуры и искусств. 2017. № 2 (25). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-igrovyie-ustroystva-v-zhizni-detey-i-podrostkov-sotsiokulturnyy-analiz> (дата обращения: 07.03.2020)
5. Ли А.В. Влияние мобильных и мультимедийных устройств на когнитивные функции подростков // БМИК. 2015. № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-mobilnyh-i-multimediynyh-ustroystv-na-kognitivnye-funktsii-podrostkov> (дата обращения: 09.03.2020)



Research of Gaming Activity on Smartphones

Zharkova O.G.*

MSUPE, Moscow, Russia,
e-mail: Olga.milk.13@yandex.ru

Barbolina S.A.**

MSUPE, Moscow, Russia,
e-mail: viplanastar@mail.ru

Afonina N.M.***

MSUPE, Moscow, Russia,
e-mail: anyafter@mail.ru

Volkova V.N.****

MSUPE, Moscow, Russia,
e-mail: valuha160@mail.ru

This article is devoted to research of gaming activity on smartphones that took place in 2019–2020. The study has involved more than 200 people of different ages from 4 to 72 years. Respondents have answered questions about their gaming activities on smartphones. The developed questionnaire is performed in Google Forms and contains 8 questions: about age, gender, the reason for the start and continue game activity, preferred genres, the time spent on games every day, the use of online games and the cost of mobile games. The collected data helped to identify the motives for starting and continuing gaming activity on smartphones. In the study were analyzed mobile games on the iOS and Android. Analysis showed that there are relationships between genres. People who prefer a particular genre tend to choose similar genres of games. We revealed the dependence of buying games on age and time in the games every day. The older people are and the more time they spend in games every day, the more they spend money in games more willingly. Gender does not affect game activity. The choice of game genres has nothing to do with age. Such conclusions made in a research of gaming activity on smartphones.

Keywords: smartphone, mobile games, games, genre, research, age, addiction, motive, question, sample.

For citation:

Zharkova O.G., Barbolina S.A., Afonina N.M., Volkova V.N. Research of Gaming Activity on Smartphones. *Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis*, 2020. Vol. 10, no. 1, pp. 75–85. DOI: 10.17759/mda.2020100104 (In Russ., abstr. In Engl.)

***Zharkova Olga Gennadievna**, student, Moscow state University of psychology and education, Moscow, Russia, e-mail: olga.milk.13@yandex.ru

****Barbolina Svetlana Aleksandrovna**, student, Moscow state University of psychology and education, Moscow, Russia, e-mail: viplanastar@mail.ru

*****Afonina Natalia Maksimovna**, student, Moscow state University of psychology and education, Moscow, Russia, e-mail: anyafter@mail.ru

******Volkova Valentina Nikolaevna**, student, Moscow state University of psychology and education, Moscow, Russia, e-mail: valuha160@mail.ru



References

1. VCIOM Internet: novaya era mobilnyh ustrojstv. [Elektronnyj resurs], 2015. Rezhim dostupa: <https://wciom.ru/index.php?id=236&uid=115255/> (Data obrashcheniya: 21.01.2020)
2. Belokrenickaya P.A., Balashova K.A. Fenomen smartfonovyh zombi (smombi). Vestnik nauki i obrazovaniya. 2019. № 1–1 (55). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fenomen-smartfonovyh-zombi-smombi> (data obrashcheniya: 18.02.2020)
3. Igrovoy rynek, trendy i prognozy – bol'shaya analitika ot App Annie. Habr [Elektronnyj resurs] – URL: <https://habr.com/ru/company/pixonic/blog/443746/> (data obrashcheniya: 20.02.2020)
4. Kruhmaleva O.V., Kruhmalev E.V. Sovremennye igrovye ustrojstva v zhizni detej i podrostkov: sociokul'turnyj analiz. Kul'tura i obrazovanie: nauchno-informacionnyj zhurnal vuzov kultury i iskusstv. 2017. № 2 (25). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-igrovye-ustrojstva-v-zhizni-detey-i-podrostkov-sotsiokulturnyy-analiz> (data obrashcheniya: 07.03.2020)
5. Li A.V. Vliyanie mobilnyh i multimedijnyh ustrojstv na kognitivnye funkcii podrostkov. BMIK. 2015. № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-mobilnyh-i-multimedijnyh-ustrojstv-na-kognitivnye-funktsii-podrostkov> (data obrashcheniya: 09.03.2020)

Применение методики агрегирования критериев для выбора инновационных изделий

Сивакова Т.В.*

ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, Москва, Россия,
РЭУ им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8026-2198>,
e-mail: sivakova15@mail.ru

Судаков В.А.**

Московский авиационный институт, Москва, Россия,
ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, Москва, Россия,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1658-1941>,
e-mail: sudakov@ws-dss.com

Особенность инновационных изделий требует учитывать большое количество критериев, которые следует агрегировать в обобщённые и строить дерево свертки с качественными, количественными и нечеткими правилами. В работе предложена методика оптимального разбиения шкал критериев на обобщенные градации для использования комбинированных методов многокритериального анализа альтернатив. Переход к меньшему количеству критериев приводит к значительному повышению размерности шкал обобщённых критериев. Шкалы приходится преобразовывать в новые шкалы с меньшим количеством градаций. Для решения задачи минимизации информационных потерь, возникающих при преобразовании шкал, определена функция Беллмана и применен метод динамического программирования. Вычислительные эксперименты показали эффективность предложенного подхода.

Для цитаты:

Сивакова Т.В., Судаков В.А. Применение методики агрегирования критериев для выбора инновационных изделий // Моделирование и анализ данных. 2020. Том 10. № 1. С. 86–95. DOI: 10.17759/mda.2020100105

**Сивакова Татьяна Владимировна*, научный сотрудник, Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В.Келдыша РАН), научный сотрудник, Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова (РЭУ им. Г.В. Плеханова), Москва, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8026-2198>, e-mail: sivakova15@mail.ru

***Судаков Владимир Анатольевич*, доктор технических наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В.Келдыша РАН), Москва, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1658-1941>, e-mail: sudakov@ws-dss.com



Ключевые слова: инновационные изделия, агрегирование, критерии, функция Беллмана, многокритериальный анализ альтернатив, шкала, ранжирование, интегральная оценка, минимизация информационных потерь.

1. ВВЕДЕНИЕ

Инновации представляют собой производственную функцию, которая на базе изменений во всей совокупности действующих на продукт факторов предопределяет его качественные изменения [1]. Поскольку существует множество альтернативных путей создания инновационной продукции, с различными прототипами, которые не могут быть все реализованы в силу ограниченности ресурсов, приходится осуществлять выбор пути используя методы многокритериального анализа альтернатив. Инновационная составляющая продукции приводит к тому, что векторный критерий имеет достаточно высокую размерность, зачастую десятки или сотни компонентов. Лицо, принимающее решение (ЛПР) не в состоянии оценить такую большую совокупность критериев, поэтому обычно прибегают к построению многоуровневого дерева критериев [2].

В этом подходе критерии объединяются в группы, и каждая из них характеризуется своим обобщенным критерием. Формирование групп должны проводить эксперты или ЛПР по смысловому признаку, т.е. интегральный критерий несет обобщенную информацию о каком-либо аспекте инновационной продукции, детально определяемом критериями, вошедшими в состав группы [3]. Для каждого обобщенного критерия следует указать решающее правило. Таким правилом может быть качественный, количественный или нечеткий метод многокритериального анализа альтернатив, в результате работы которого вычисляется интегральная оценка по обобщенному критерию. Процедуру перехода к векторному критерию меньшей размерности, построенному на обобщенных критериях, будем называть агрегированием [4]. Агрегирование будет повторяться до тех пор, пока мы не получим дерево критериев, в корне которого находится один обобщенный критерий.

2. АГРЕГИРОВАНИЕ

Альтернативой предложенного дерева агрегирования критериев является иерархия в методе анализа иерархий (МАИ) Томаса Саати [5]. Но в отличие от МАИ, критерии на промежуточных уровнях дерева могут быть как количественными, так и качественными, и в решающем правиле используется не только взвешенная сумма и мультипликативная свертка, но и другие методы, включая комбинированный метод на базе областей предпочтений [6].

Дерево агрегирования критериев можно представить следующим образом. На нижнем уровне дерева образуется N_1 групп, по q_{i1} элементов в каждой, где q_{i1} – число критериев в i -ой группе (желательно чтобы q_{i1} не превосходило 10, иначе применение качественных методов затруднительно). Если n – число первичных критериев, то число N_1 находится в пределах:



$$\left\lceil \frac{n}{\max_i q_{li}} \right\rceil \leq N_1 \leq \left\lfloor \frac{n}{\min_i q_{li}} \right\rfloor.$$

Так как n/q_{li} не всегда целое число, то применяется операция $\lceil \dots \rceil$ – округление до ближайшего целого большего или равного операнду. На следующем уровне дерева: q_2 – число критериев в группах, а роль входных критериев исполняют N_1 групп нижнего уровня и т.д. В результате применения данной процедуры в корне дерева останется один интегральный критерий.

При таком агрегировании критериев, получается высокая размерность шкал обобщенных критериев. Так если даны 4 критерия и у каждого из них 5 градаций, то для различимости всех комбинаций значений необходима шкала с 625 градациями. Работа качественных методов на высокоразмерных шкалах затруднительна, поэтому необходимо разработать методику снижения размерности таких шкал. Решение данной задачи разбивается на 2 этапа: первый этап – выбор числа градаций для новой шкалы, и второй – разбиение исходной шкалы на заданное количество градаций. Шкалу, полученную в результате применения данной методики, назовем обобщенной. На первом этапе ЛПР или эксперт, на основе содержательных соображений, сам назначает требуемую точность оценки. На втором этапе предлагаются три метода:

1. Разбиение шкалы на интервалы с одинаковым числом градаций. С точки зрения информационных потерь, как будет показано ниже, этот метод не всегда эффективен.
2. Предоставление ЛПР возможности самому определять разбиение на основе содержательного анализа задачи. Метод неудобен тем, что ЛПР приходится тратить много времени на разбиение и согласование шкал.
3. Разбиение шкалы на основе минимизации информационных потерь используя понятие энтропии агрегирующего критерия.

Понятно, что процедура дискретизации шкал приводит к информационным потерям. Информация о инновационном продукте наиболее полно отражена на уровне первичных критериев. Информационные потери растут от первичных критериев к интегральному критерию в корне дерева агрегирования. Оценить информационные потери, которые возникают в процессе агрегирования критериев, можно с информационной энтропии [7]. Количество информации измеряется разностью энтропий до и после вычисления значения критерия. В данном случае энтропия критерия после вычисления значения критерия равна нулю и количество информации определяется энтропией значения критерия до его вычисления. Проводить разбиение шкалы обобщенного критерия на градации следует так, чтобы энтропия критерия была максимальной. Поэтому шкалу критерия следует разбивать интервалы приближенные к таким, в которых значения критерия появлялись бы с одинаковыми вероятностями.

3. МЕТОД РЕШЕНИЯ

В рассматриваемой задаче имеется исходная шкала обобщенного критерия с большим количеством градаций и из нее следует получить шкалу с меньшим количеством градаций с минимальными информационными потерями. Формализуем постановку соответствующей оптимизационной задачи, она решается для каждого обобщенного критерия на всех уровнях агрегирования.

Целевая функция примет следующий вид:

$$\max_{u_1, u_2, \dots, u_{m^*}} I^* = - \sum_{r=1}^{m^*} \left(\sum_{k=\sum_{l=1}^{r-1} u_l + 1}^{\sum_{l=1}^r u_l} p_k \right) \log_2 \left(\sum_{k=\sum_{l=1}^{r-1} u_l + 1}^{\sum_{l=1}^r u_l} p_k \right),$$

ограничения:

$$\sum_{r=1}^{m^*} u_r = m,$$

$$u_r > 0, \quad r = 1, \dots, m^*,$$

где

u_r – оптимизационные переменные, показывающие сколько градаций на исходной шкале включается в r -ю градацию на обобщенной шкале,

p_k – вероятность k -го состояния в исходной шкале,

m^* – число градаций в обобщенной шкале,

m – число градаций исходной шкалы,

$r = 1, \dots, m^*$ – номер градации в обобщенной шкале,

$k = 1, \dots, m^*$ – номер градации в исходной шкале,

$\sum_{l=1}^{r-1} u_{l+1}$ – индекс первой градации исходной шкалы, включенной в r -ю градацию обобщенной шкалы,

$\sum_{l=1}^r u_l$ – индекс последней градации исходной шкалы, включенной в r -ю градацию обобщенной шкалы.

Практическое использование такой постановки задачи затрудняет необходимость знания p_k . Не всегда существует простой способ нахождения вероятностного распределения значений векторного критерия. Однако, при продолжительной эксплуатации информационно-аналитических систем инновационно активных предприятий, оценки p_k могут быть вычислены на основе обработки статистически:

$$p_k = m / n,$$

где m – число альтернатив у которых значение критерия попало в k -ю градацию, n – общее число оцениваемых альтернатив.

Если система только начинает функционировать, то можно использовать субъективные вероятности, основанные на опросе экспертов по методу эталонных лотерей.

Данная оптимизационная задача относится к классу задач дискретного динамического программирования [8]. Решение поставленной задачи основано на выводе



функции Беллмана $\Lambda_r(\xi)$. Она определяет максимум энтропии r первых градаций обобщенной шкалы, найденный при условии, что ξ градаций исходной шкалы объединяются в r первых градаций обобщенной шкалы:

$$\begin{aligned} \ddot{A}_r(\xi) = \max_{u_1, \dots, u_r} & \left(- \sum_{j=1}^r \left(\sum_{k=\sum_{l=1}^j u_l}^{\sum_{l=1}^{j+1} u_l} p_k \right) \log_2 \left(\sum_{k=\sum_{l=1}^j u_l}^{\sum_{l=1}^{j+1} u_l} p_k \right) \right), \\ & \sum_{j=1}^r u_j \leq \xi, \\ & r \leq \xi, \xi = 1, 2, \dots, m. \end{aligned}$$

Для вычисления функции Беллмана выводится следующая рекуррентная формула:

$$\begin{aligned} \ddot{A}_1(\xi) &= \max_{1 \leq u_1 \leq \xi} \left\{ - \left(\sum_{k=1}^{u_1} p_k \right) \log_2 \left(\sum_{k=1}^{u_1} p_k \right) \right\}, \\ \ddot{A}_2(\xi) &= \max_{1 \leq u_2 \leq \xi} \left\{ - \left(\sum_{k=\xi-u_2+1}^{\xi} p_k \right) \log_2 \left(\sum_{k=\xi-u_2+1}^{\xi} p_k \right) + \ddot{A}_1(\xi - u_2) \right\}, \\ & \dots \\ \ddot{A}_r(\xi) &= \max_{1 \leq u_r \leq \xi} \left\{ - \left(\sum_{k=\xi-u_r+1}^{\xi} p_k \right) \log_2 \left(\sum_{k=\xi-u_r+1}^{\xi} p_k \right) + \ddot{A}_{r-1}(\xi - u_r) \right\}. \end{aligned}$$

При $\xi=m$ и $r=m^*$ функция Беллмана будет равна оптимальному значению целевой функции для всей шкалы:

$$\begin{aligned} \ddot{A}_{m^*}(m) &= \max_{1 \leq u_{m^*} \leq m} \left\{ - \left(\sum_{k=m-u_{m^*}+1}^m p_k \right) \log_2 \left(\sum_{k=m-u_{m^*}+1}^m p_k \right) + \ddot{A}_{m-1}(m - u_{m^*}) \right\} = \\ &= \max_{u_r} \left(- \sum_{r=1}^{m^*} \left(\sum_{k=\sum_{l=1}^r u_l}^{\sum_{l=1}^{r+1} u_l} p_k \right) \log_2 \left(\sum_{k=\sum_{l=1}^r u_l}^{\sum_{l=1}^{r+1} u_l} p_k \right) \right). \end{aligned}$$

4. АПРОБАЦИЯ МЕТОДА

Методика агрегирования критериев носит эвристический характер, и в зависимости от того, как критерии объединяются в группы, можно получить различный результат. Поэтому актуален вопрос о корректности использования агрегирования для многокритериального анализа альтернатив. Так как структура всех узлов дерева критериев идентична, можно допустить, что если для одного из обобщенных критериев использование процедуры агрегирования адекватно исходной (не агрегированной) оценке, то эта адекватность сохраняется для всего дерева критериев.

Способы вычисления интегральных оценок альтернатив будем считать адекватными, если, пользуясь ими, одно и то же лицо, принимающее решения, получит сходные ранжирования альтернатив.

Для определения меры близости на отношениях линейного порядка воспользуемся специальной мерой, предложенной Кемени.

Расстояние между ранжированием A и B определяется по формуле:

$$d(A, B) = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^N |a_{ij} - b_{ij}|,$$

где N – число альтернатив,

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я альтернатива предпочтительней } j\text{-й,} \\ 0, & \text{если } i\text{-я альтернатива эквивалентна } j\text{-й,} \\ -1, & \text{если } i\text{-я альтернатива предпочтительней } i\text{-й,} \end{cases}$$

b_{ij} определяется аналогично.

Максимально возможное расстояние между ранжированиями равно:

$$\max d(A, B) = N(N - 1) / 2.$$

В результате нормирования расстояния между ранжированиями получается коэффициент ранговой корреляции Кендалла:

$$\tau(A, B) = 1 - 2 \frac{d(A, B)}{N(N - 1)}.$$

Кроме того, можно воспользоваться коэффициентом ранговой корреляции Спирмена:

$$\rho(A, B) = 1 - \frac{6}{N^3 - N} \sum_{i=1}^N (r_i - s_i)^2,$$

где r_i – ранг i -й альтернативы в ранжировании A , s_i – ранг i -й альтернативы в ранжировании B .

Сложно предпочесть один из этих коэффициентов, результаты расчетов по ним разнятся, хоть и незначительно, поэтому вычислим оценку корреляции между ранжированиями обоими способами. Оценка проводилась на двух типовых задачах ранжирования образцов инновационной продукции в пространстве четырех критериев, для получения ранжирования A правило вычисления рангов альтернатив применялось непосредственно к первичным критериям, а для ранжирования B проводилось предварительное агрегирование первичных критериев в два агрегирующих критерия. Результаты статистической обработки данных эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции

ЛПР	Эксперимент 1		Эксперимент 2	
	τ	ρ	τ	ρ
1	0,18	0,25	0,42	0,59
2	0,66	0,82	0,72	0,85
3	0,34	0,45	0,47	0,58
4	0,58	0,74	0,58	0,63
5	0,84	0,96	0,48	0,64
6	0,46	0,63	0,4	0,44
7	0,66	0,83	0,41	0,53



ЛПР	Эксперимент 1		Эксперимент 2	
	τ	ρ	τ	ρ
8	0,19	0,2	0,2	0,21
9	0,84	0,96	0,73	0,87
10	0,65	0,8	0,59	0,72
11	0,69	0,87	0,69	0,87
12	0,82	0,95	0,74	0,9
Диапазон	[0,18; 0,86]	[0,2; 0,97]	[0,2; 0,86]	[0,21; 0,97]
Среднее	0,61	0,75	0,59	0,71
Дисперсия	0,05	0,06	0,04	0,04

На основе анализа результатов экспериментов сделаны следующие выводы:

- ранжирования полученные без агрегирования и с агрегированием хорошо коррелированы во всех экспериментах как по Кендаллу (τ), так и по Спирмену (ρ);
- значение коэффициента корреляции Кендалла в среднем меньше, но даже такие значения все-равно говорят о значимой корреляции;
- большинство ЛПР высказали мнение, что в большей степени их точку зрения отражает ранжирование полученное в результате агрегирования, что объясняется тем, что непосредственное построение качественных решающих при высокой размерности критерия вызывает затруднения за счет необходимости запоминания уровней предпочтений для большого числа комбинаций значений критериев;
- низкая дисперсия коэффициентов корреляции позволяет считать экспериментальные данные заслуживающими доверие, несмотря на сравнительно небольшое число наблюдений.

Следовательно, методика агрегирования критериев не вносит значимых искажений в учет предпочтений ЛПР.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход позволяет снизить информационные потери, при ранжировании и выборе образцов инновационной продукции с учетом векторного критерия высокой размерности. Использование энтропийного подхода к разбиению шкал дает возможность использовать качественные методы многокритериального анализа альтернатив с высокоразмерными критериями. Он может быть применен при создании систем планирования, управления на инновационно-активных и наукоемких предприятиях.

Данная методика процедуры разбиения шкал критериев была апробирована для задачи выбора оборудования для проведения космических экспериментов на российском сегменте Международной Космической Станции (МКС). Был проведен расчет выигрыша от оптимального разбиения, в котором для определения оценок вероятностей попадания значений в градации шкал использовались данные по 93 космическим экспериментам [9]. Исследование зависимости энтропии от числа градаций в данном примере показало, что не целесообразно использовать больше 36 градаций, так как энтропия перестает существенно возрастать. Если число градаций велико, то строить решающие



правила в качественных шкалах трудоемко, так как необходимо задавать предпочтения на большом количестве областей. Разбиение на 16 градаций позволило сохранить 83 % информации из исходной шкалы, что является хорошим компромиссом между сокращением шкалы в 16 раз и вынужденными информационными потерями.

Литература

1. *Michaelides P.G.* Joseph Schumpeter and the German Historical School. *Cambridge Journal of Economics*. 33(3).2009, pp. 495–516.
2. *Corrente, S., Greco, S. and Slowinski R.* Multiple Criteria Hierarchy Process in Robust Ordinal Regression. *Decision Support Systems*. 53(3). 2012, pp. 660–674.
3. *Литвак Б.Г.* Экспертные оценки и принятие решений. М.: Патент, 1996, 271 с.
4. *Посадский А.И., Сивакова Т.В., Судаков В.А.* Агрегирование нечетких суждений экспертов // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2019. № 101. 12 с. doi:10.20948/prepr-2019–101 URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019–101>.
5. *Saaty T.L. and Vargas L.G.* Models Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process. Boston: Kluwer Academic Publishers. 2000.
6. *Batkovskiy, A. M., Nesterov, V. A., Semenova, E. G., Sudakov, V. A. and Fomina A.V.* Developing intelligent decision support systems in multi-criteria problems of administrative-territorial formations infrastructure projects assessment. *Journal of Applied Economic Sciences*. 5(51). 2017, pp. 1301– 1311.
7. *Arndt C.* Information Measures: Information and its Description in Science and Engineering. Berlin: Springer. 2004.
8. *Eddy S.R.* What is Dynamic Programming? *Nature Biotechnology*. 22(7). 2004, pp. 909–910.
9. *Sudakov V.A., Nesterov V.A. and Kurennykh A.E.* Integration of decision support systems ‘kosmos’ and WS-DSS with computer models. *Proceedings of 2017 10th International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD)*. Moscow, Russia: IEEE.
10. *Сивакова Т.В., Судаков В.А.* Метод нечетких областей предпочтении для оценки эффективности инноваций // XXVIII Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации». Алушта, 14–20 сентября 2019 г. Сборник трудов. М.: Изд.-во Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2019. С. 81–82.



Application of Criteria Aggregation Techniques for the Selection of Innovative Products

Sivakova T.V.*

Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia,
Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8026-2198>,
e-mail: sivakova15@mail.ru

Sudakov V.A.**

Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia,
Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1658-1941>,
e-mail: sudakov@ws-dss.com

The peculiarity of innovative products requires taking into account a large number of criteria that should be aggregated into generalized ones and building a convolution tree with qualitative, quantitative and fuzzy rules. The paper proposes a methodology for the optimal partitioning of criteria scales into generalized gradations for using combined methods of multicriteria analysis of alternatives. The transition to fewer criteria leads to a significant increase in the dimension of the scales of generalized criteria. Scales have to be converted to new scales with fewer gradations. To solve the problem of minimizing the information loss occurring when converting the scales picked Bellman function and applied method of dynamic programming. Computational experiments have shown the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: innovative products, the aggregation criteria, the Bellman function, multicriteria analysis of alternatives, scale, ranging, integrated assessment, minimization of information loss.

References

1. Michaelides P.G. Joseph Schumpeter and the German Historical School. Cambridge Journal of Economics. 33(3).2009, pp. 495–516.
2. Corrente, S., Greco, S. and Slowinski R. Multiple Criteria Hierarchy Process in Robust Ordinal Regression. Decision Support Systems. 53(3). 2012, pp. 660–674. (In Russ., abstr. In Engl.)

For citation:

Sivakova T.V., Sudakov V.A. Application of Criteria Aggregation Techniques for the Selection of Innovative Products. *Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis*, 2020. Vol. 10, no. 1, pp. 86–95. DOI: 10.17759/mda.2020100105

***Sivakova Tatyana Vladimirovna**, Researcher, Keldysh Institute of Applied Mathematics (Russian Academy of Sciences), researcher, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8026-2198>, e-mail: sivakova15@mail.ru

****Sudakov Vladimir Anatolievich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Leading Researcher, Keldysh Institute of Applied Mathematics (Russian Academy of Sciences), Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1658-1941>, e-mail: sudakov@ws-dss.com



3. Litvak B.G. Jekspertnye ocenki i prinjatije reshenij [Expert evaluation and decision-making]. M.: Patent, 1996, 271 c.
4. Posadskij A.I., Sivakova T.V., Sudakov V.A. Agregirovanie nechetkih suzhdenij ekspertov [Aggregation of fuzzy expert judgments]. Preprinty IPM im. M.V. Keldysha. 2019. № 101. 12 s. doi:10.20948/prepr-2019-101 URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-101>.
5. Saaty T.L. and Vargas L.G. Models Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process. Boston: Kluwer Academic Publishers. 2000.
6. Batkovskiy, A. M., Nesterov, V. A., Semenova, E. G., Sudakov, V. A. and Fomina A.V. Developing intelligent decision support systems in multi-criteria problems of administrative-territorial formations infrastructure projects assessment. Journal of Applied Economic Sciences. 5(51). 2017, pp. 1301– 1311.
7. Arndt C. Information Measures: Information and its Description in Science and Engineering. Berlin: Springer. 2004.
8. Eddy S.R. What is Dynamic Programming? Nature Biotechnology. 22(7). 2004, pp. 909–910.
9. Sudakov V.A., Nesterov, V. A. and Kurennykh A.E. Integration of decision support systems ‘kosmos’ and WS-DSS with computer models. Proceedings of 2017 10th International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD). Moscow, Russia: IEEE.
10. Sivakova T.V., Sudakov V.A. Metod nechetkih oblastej predpochtenii dlja ocenkiy effektivnosti innovacij [Fuzzy areas preference method for evaluating innovation performance]. XXVIII Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija “Sovremennye tehnologii v zadachah upravlenija, avtomatiki i obrabotki informacii”. Alushta, 14–20 sentjabrja 2019 g. Sbornik trudov. [Proceedings of the XXVIII International Scientific and Technical Conference “Modern Technologies in the Problems of Control, Automation and Information Processing”], Alushta. M.: Izd.-vo Nacional’nyj issledovatel’skij jadernyj universitet “MIFI”, 2019. S. 81–82.



ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5

Сравнительный анализ эффективности линейных субоптимальных регуляторов при наличии неполных измерений

Пантелеев А.В. *

МАИ (НИУ), Москва, Россия,
e-mail: avpanteleev@inbox.ru

Яковлева А.А. **

МАИ (НИУ), Москва, Россия,
e-mail: ayakovleva982@gmail.com

В статье приводятся результаты сравнительного анализа эффективности стационарных линейных регуляторов, формирующих обратную связь по выходным переменным в линейных стационарных непрерывных динамических системах. Реализованы алгоритмы синтеза регулятора на основе псевдообращения матрицы, входящей в модель измерительной системы, и поиска H^∞ -управления. На основе данных алгоритмов разработан комплекс программ в среде MATLAB для решения прикладных задач, позволяющий находить параметры синтезируемых регуляторов, моделировать процессы в динамических системах на заданном отрезке времени для получения информации о качестве переходных процессов и анализа асимптотической устойчивости замкнутой системы.

Ключевые слова: линейный регулятор, H^∞ -управление, управление с обратной связью, стабилизация самолета, алгоритмическое обеспечение, программное обеспечение.

Для цитаты:

Пантелеев А.В., Яковлева А.А. Сравнительный анализ эффективности линейных субоптимальных регуляторов при наличии неполных измерений // Моделирование и анализ данных. 2020. Том 10. № 1. С. 96–109. DOI: 10.17759/mda.2020100106

***Пантелеев Андрей Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой “Математическая кибернетика” института «Информационные технологии и прикладная математика», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ (НИУ)), Москва, Россия, e-mail: avpanteleev@inbox.ru

****Яковлева Александра Алексеевна**, студент магистратуры, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ (НИУ)), Москва, Россия, e-mail: ayakovleva982@gmail.com

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе рассматриваются следующие задачи синтеза при наличии неполных измерений: синтез стационарного линейного регулятора по выходу [2; 3] и синтез H^∞ -регулятора [1; 3–5].

1. Синтез субоптимального стационарного линейного регулятора при неполной информации о состоянии.

Математическая модель объекта управления описывается системой линейных обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (1)$$

где x – вектор состояния системы, $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in R^n$; u – вектор управления, $u = (u_1, \dots, u_q)^T \in R^q$; $t \in [0, +\infty)$ – промежуток времени функционирования системы; A – матрица системы размеров $(n \times n)$, B – матрица влияния управления на вектор состояния размеров $(n \times q)$, внешние воздействия не учитываются.

Начальное условие $x(0) = x_0$ задает начальное состояние системы.

Уравнение модели измерительной системы:

$$y(t) = Cx(t), \quad (2)$$

где $y = (y_1, \dots, y_m)^T \in R^m$ – вектор выхода, C – матрица, учитывающая неполноту измерений, размеров $(m \times n)$, $m \leq n$, $\text{rg } C = m$.

Задан закон управления по выходу в линейной форме:

$$u(t) = -Ky(t) = -KCx(t), \quad (3)$$

где K – матрица коэффициентов усиления регулятора размеров $(q \times m)$.

Критерий качества управления имеет вид:

$$I = \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} [x^T(t)Sx(t) + u^T Qu] dt \rightarrow \min, \quad (4)$$

где S – матрица размеров $(n \times n)$, задающая требования к переходным процессам (неотрицательно определенная, симметрическая), Q – матрица размеров $(q \times q)$, задающая требования к затратам на управление (положительно определенная, симметрическая).

Требуется найти субоптимальный стационарный регулятор вида (3), который обеспечивает близость к минимальному значению критерия качества (4) для любых начальных состояний (иными словами, наилучшую матрицу $K^* \in R^{q \times m}$ коэффициентов усиления регулятора).

2. Синтез H^∞ -регулятора.

Рассматривается модель объекта управления, описываемая системой линейных дифференциальных уравнений с аддитивными возмущениями:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Dd(t), \quad (5)$$

где x – вектор состояния системы, $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in R^n$; u – вектор управления, $u = (u_1, \dots, u_q)^T \in R^q$; d – вектор внешних возмущений, $d = (d_1, \dots, d_r)^T \in R^r$; $t \in [0, +\infty)$ – промежуток времени функционирования системы; A – матрица систе-



мы, B – матрица влияния управления на вектор состояния, D – матрица размеров $(n \times r)$ влияния возмущений на вектор состояния.

Начальное условие $x(t_0) = x_0$ задает начальное состояние системы.

Уравнение модели измерительной системы задается соотношением (2). Закон управления определяется формулой (3). Критерий качества управления имеет вид (4).

Обозначим $\|z(t)\|^2 = x^T(t)Sx(t) + u^T(t)Qu(t)$, где z – характеристика качества процесса управления.

Требуется найти такую матрицу $K^* \in R^{q \times m}$, что выполняется условие

$$\frac{\int_0^{\infty} \|z(t)\|^2 dt}{\int_0^{\infty} \|d(t)\|^2 dt} = \frac{\int_0^{\infty} [x^T(t)Sx(t) + u^T(t)Qu(t)] dt}{\int_0^{\infty} d^T(t)d(t) dt} \leq \gamma^2, \quad (6)$$

где $\gamma \geq 0$ – заданное число, причем замкнутая система объект-регулятор является асимптотически устойчивой.

2. АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ

Для решения задачи синтеза стационарного линейного регулятора по выходу предлагается не формировать наблюдатель состояния, генерирующий оценку вектора состояния по поступающим неполным измерениям, и, как следствие, не использовать полученную оценку в классическом оптимальном линейном стационарном регуляторе. Вместо этого предлагается приблизительно восстанавливать вектор состояния, используя операцию псевдообращения матрицы C в уравнении (2) [6]. При этом вместо вектора состояния x находится вектор $\tilde{x} = C^{-1}y = C^T(CC^T)^{-1}y$, который подставляется в структуру оптимального линейного регулятора при наличии полной информации о состоянии [2]: $u^*(x) = -Q^{-1}B^T Px$, где C^{-1} – псевдообратная матрица, P – решение алгебраического уравнения Риккати. Результат, как правило, может отличаться от оптимального, т.е. быть субоптимальным.

Предполагается следующий алгоритм решения.

Шаг 1. Составить и решить алгебраическое уравнение Риккати:

$$-A^T P - PA + PBQ^{-1}B^T P - S = O,$$

где матрица P размеров $(n \times n)$ симметрическая и положительно определенная.

Шаг 2. Найти матрицу коэффициентов усиления регулятора $F = Q^{-1}B^T PC^T(CC^T)^{-1}C$ и сформировать оптимальный регулятор вида $u^*(y) = -K^*y = -K^*Cx = -Fx$.

Шаг 3. Реализовать процесс моделирования системы (1) на конечном промежутке времени, определяемым завершением переходных процессов в системе, при заданных начальных условиях с управлением, полученным на шаге 2. Для моделирования рекомендуется использовать явные или неявные численные методы решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, например, метод Рунге-Кутты 4-го порядка.



Проанализировать выполнение требований к переходным процессам. При их невыполнении продолжить подбор матриц S, Q функционала (4).

Шаг 4. Исследовать асимптотическую устойчивость полученной замкнутой системы $\dot{x}(t) = [A - BQ^{-1}B^T PC^T (CC^T)^{-1}C]x(t)$.

Алгоритм нахождения H^∞ -управления имеет следующий вид [1]:

Задать $\gamma \geq 0, \varepsilon > 0$.

Шаг 1. Положить $k = 0, L^0 = O$ – нулевая матрица.

Шаг 2. Составить и решить алгебраическое уравнение Риккати, то есть найти P^k :
 $A^T P^k + P^k A + \frac{1}{\gamma^2} P^k D D^T P^k - P^k B Q^{-1} B^T P^k + L^k Q^{-1} L^k + S = 0$.

Шаг 3. Определить значение вспомогательных матриц на $(k + 1)$ -м шаге:

$$K^{k+1} = Q^{-1}(B^T P^k + L^k)C^T (CC^T)^{-1}, L^{k+1} = QK^{k+1}C - B^T P^k.$$

Шаг 4. Если $\|K^{k+1} - K^k\| \leq \varepsilon$, то цикл (шаг 2 – шаг 3) заканчивается и $K^* = K^{k+1}$. Иначе положить $k = k + 1$ и перейти к шагу 2.

Шаг 5. Найти H^∞ -регулятор (3): $u^*(y) = -K^* y = -K^* Cx = -Fx$.

Шаг 6. Реализовать процесс моделирования системы (5) на конечном промежутке времени, определяемым завершением переходных процессов в системе, при заданных начальных условиях с управлением, полученным на шаге 5. Функции возмущений $d(t)$ выбираются либо из класса ограниченных функций, либо одновременно ограниченных и стремящихся к нулю при $t \rightarrow \infty$. Для моделирования рекомендуется использовать явные или неявные численные методы решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, например, метод Рунге-Кутты 4-го порядка.

Проанализировать выполнение требований к переходным процессам. При их невыполнении продолжить подбор матриц S, Q функционала (4) и параметра γ .

Шаг 7. Исследовать асимптотическую устойчивость полученной замкнутой системы $\dot{x}(t) = [A - BKC]x(t) + Dd(t)$.

Шаг 8. Найти для полученной траектории $x(t)$ наихудшее возмущение вида $d^*(t) = \frac{1}{\gamma^2} D^T P x(t)$.

3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

На основе изложенных алгоритмов разработан программный комплекс, с помощью которого проводилась реализация процедур синтеза линейных регуляторов в двух постановках задач, сформулированных выше. Для его создания использовался математический пакет для решения прикладных задач MATLAB. Выбор данного программного пакета был обусловлен гибкостью его функционала, а также широким набором процедур для работы с матричной алгеброй. Реализованный комплекс программ позволяет моделировать функционирование замкнутой системы, обеспечивая визуализацию переходных процессов при различных наборах входных данных.

Решение задачи и сравнительный анализ линейных регуляторов

Рассмотрим в качестве примера задачу стабилизации самолёта F-16, $n = 5, q = 1, m = 4, r = 1$. Тогда математическая модель объекта управления описывается следующими матрицами, используемыми в уравнениях (1), (5):



$$A = \begin{pmatrix} -1,01887 & 0,90506 & -0,00215 & 0 & 0 \\ 0,82225 & -1,07741 & -0,17555 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -20,2 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & -10 & 0 \\ -16,26 & -0,9788 & 0,4852 & 0 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 20,2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Матрица уравнения измерительной системы (2) имеет вид:

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 57,2958 & 0 \\ 0 & 57,2958 & 0 & 0 & 0 \\ -16,26 & -0,9788 & 0,4852 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Матрицы квадратичного критерия качества (4):

$$S = \begin{pmatrix} 264 & 16 & 1 & 0 & 0 \\ 16 & 60 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 100 \end{pmatrix}, Q = 0,1.$$

Вектор состояния $x = (x_1, \dots, x_5)^T$, где x_1 – угол атаки, x_2 – угловая скорость изменения угла тангажа, x_3 – угол поворота привода, x_4 – пропущенное через фильтр значение измеренного угла атаки, x_5 – ошибка обработки входного сигнала. Зададим вектор начальных состояний: $x_0 = (0, 1; 1; 0, 05; 0, 1; 0, 01)^T$.

В качестве внешних возмущений в (5) была выбрана функция Хевисайда без коэффициента усиления:

$$d(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ 1, & t \geq 0. \end{cases}$$

Рассмотрим задачу синтеза H^∞ - регулятора. Для его нахождения необходимо обеспечить выполнение условия (6). Определение параметра γ проводилось опытным путём. Результаты серии запусков для поиска наименьшего параметра γ приведены в табл. 1, графики зависимостей координат от времени приведены на рис. 1–6. На основании полученных результатов можно утверждать, что $\gamma = 0,03$ является наименьшим значением параметра, при котором траектории $x(t)$ удовлетворяют требованиям к переходным процессам. Впоследствии используется значение параметра $\gamma = 0,03$, так как оно все еще гарантирует сохранение свойства асимптотической устойчивости замкнутой системы.

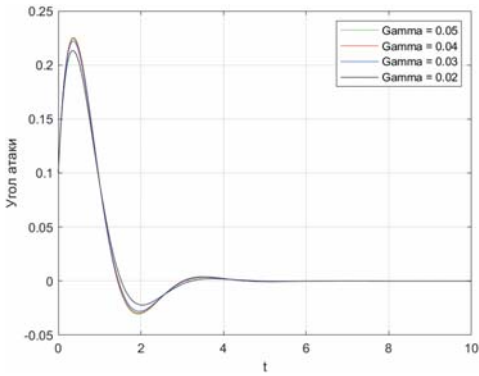


Рис. 1. Изменение угла атаки

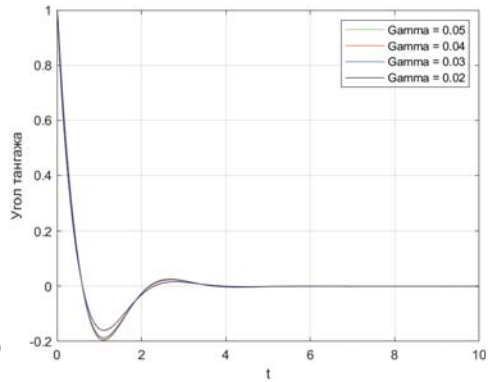


Рис. 2. Изменение угла тангажа

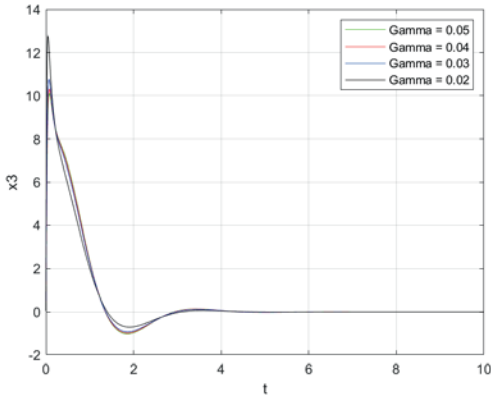


Рис. 3. Изменение угла поворота привода

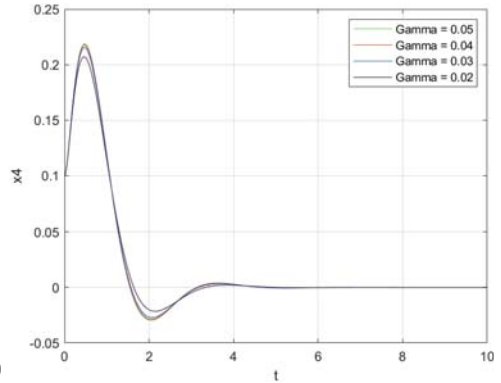


Рис. 4. Изменение значения измеренного угла атаки, пропущенного через фильтр

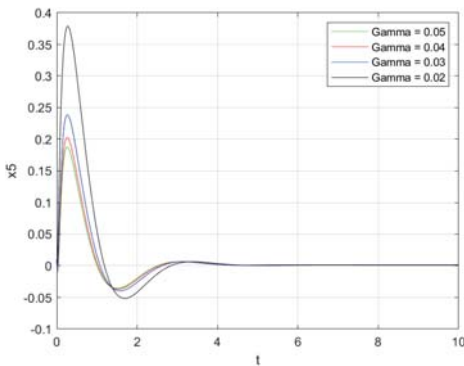


Рис. 5 Изменение ошибки обработки входного сигнала

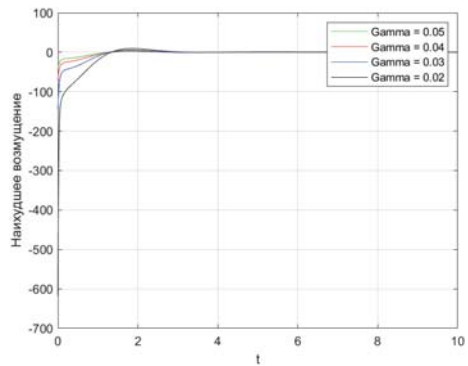


Рис. 6 Изменение траектории наихудшего возмущения $d^*(t)$



Таблица 1

Результаты работы алгоритма для поиска γ

		1	2	3	4
Параметры запуска	γ	0,05	0,04	0,03	0,02
$u(t)$ $x(t)^T Sx(t)$ $u(t)^T Qu(t)$	$t = 0$	21.3450	22.6836	26.3068	49.8403
		65.8600	65.8600	65.8600	65.8600
		45.5610	51.4545	69.2050	248.4060
	$t = 2$	-0.9820	-0.9605	-0.9101	-0.7272
		0.4010	0.3970	0.3915	0.4130
		0.0965	0.0923	0.0828	0.0529
	$t = 4$	0.0083	0.0076	0.0059	-0.0017
		0.0025	0.0024	0.0023	0.0024
		6.8359e-06	5.7266e-06	3.4633e-06	2.8966e-07
	$t = 6$	-0.0497	-0.0500	-0.0505	-0.0518
		2.5683e-04	2.3852e-04	1.9860e-04	8.3810e-05
		2.4730e-04	2.4985e-04	2.5521e-04	2.6843e-04
	$t = 8$	-0.0498	-0.0498	-0.0497	-0.0495
		2.1785e-04	2.0445e-04	1.7565e-04	9.4633e-05
		2.4836e-04	2.4796e-04	2.4709e-04	2.4466e-04
	$t = 10$	-0.0495	-0.0495	-0.0495	-0.0495
		2.2125e-04	2.0775e-04	1.7857e-04	9.5035e-05
		2.4472e-04	2.4475e-04	2.4481e-04	2.4502e-04

Рассмотрим решение задачи синтеза субоптимального регулятора по выходу. Результаты приведены далее в табл. 2 и табл. 3, а графики изменения некоторых координат изображены на рис. 7–14.

Таблица 2

Результаты синтеза субоптимального регулятора по выходу

		1	2	3	4
Параметры запуска	Q	0,1	0,05	0,075	0,25
$u(t)$ $x(t)^T Sx(t)$ $u(t)^T Qu(t)$	$t = 0$	16.0088	18.7506	17.0267	13.6765
		65.8600	65.8600	65.8600	65.8600
		25.6280	17.5792	21.7430	46.7615
	$t = 2$	-1.6160	-1.4901	-1.5610	-1.7009
		1.1088	0.8546	0.9870	1.5069
		0.2611	0.1110	0.1827	0.7233
	$t = 4$	0.1138	0.0821	0.0978	0.2007
		0.0180	0.0104	0.0139	0.0436
		0.0013	3.371e-04	7.172e-04	0.0101
	$t = 6$	0.0127	0.0110	0.0121	0.0030
		2.509e-04	1.315e-04	1.876e-04	7.2570e-04
		1.611e-05	6.028e-06	1.102e-05	2.3214e-06



		1	2	3	4
Параметры запуска	Q	0,1	0,05	0,075	0,25
	$u(t)$ $x(t)^T Sx(t)$	$t = 8$	-0.0032	-0.0021	-0.0027
4.472e-06			1.727e-06	2.923e-06	1.3729e-05
1.043e-06			2.183e-07	5.311e-07	5.8557e-06
$u(t)^T Qu(t)$	$t = 10$	1.636e-04	6.125e-05	1.04e-04	7.4570e-04
		6.923e-08	2.076e-08	3.99e-08	4.2456e-07
		2.685e-09	1.876e-10	8.112e-10	1.3902e-07

Таблица 3

Результаты синтеза H^∞ -управления

		1	2	3	4
Параметры запуска	Q	0,1	0,05	0,075	0,25
	γ	0,03	0,03	0,03	0,03
$u(t)$ $x(t)^T Sx(t)$ $u(t)^T Qu(t)$	$t = 0$	26.3068	25.6611	25.4380	53.0917
		65.8600	65.8600	65.8600	65.8600
		69.2050	32.9245	48.5318	704.6824
	$t = 2$	-0.9101	-0.9806	-0.9490	-0.5536
		0.3915	0.3867	0.3884	0.5000
		0.0828	0.0481	0.0675	0.0766
	$t = 4$	0.0059	0.0045	0.0056	-0.0130
		0.0023	0.0022	0.0023	0.0036
		3.4633e-06	1.0064e-06	2.3310e-06	4.1990e-05
	$t = 6$	-0.0505	-0.0493	-0.0499	-0.0519
		1.9860e-04	1.2971e-04	1.7020e-04	1.3829e-04
		2.5521e-04	1.2171e-04	1.8693e-04	6.7404e-04
	$t = 8$	-0.0497	-0.0498	-0.0498	-0.0494
		1.7565e-04	1.0403e-04	1.4390e-04	1.9932e-04
		2.4709e-04	1.2418e-04	1.8585e-04	6.0905e-04
	$t = 10$	-0.0495	-0.0495	-0.0495	-0.0495
		1.7857e-04	1.0597e-04	1.4644e-04	1.9541e-04
		2.4481e-04	1.2238e-04	1.8358e-04	6.1289e-04

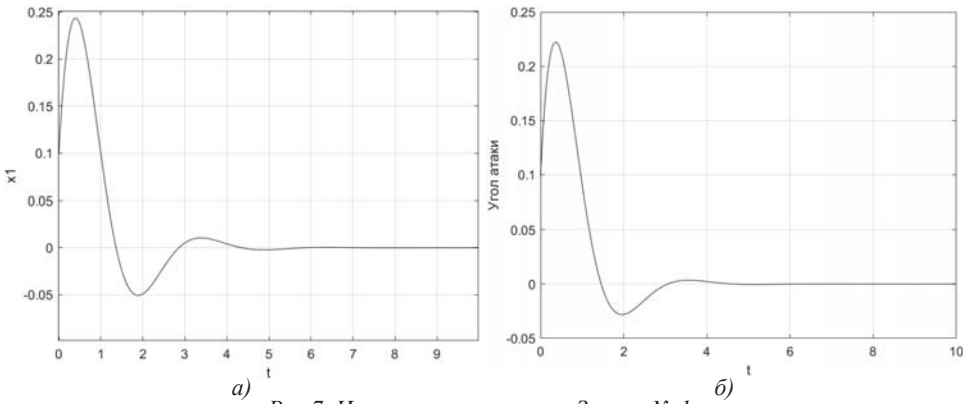


Рис.7. Изменение угла атаки. Запуск № 1:

а – субоптимальный регулятор по выходу, б – H^∞ -регулятор

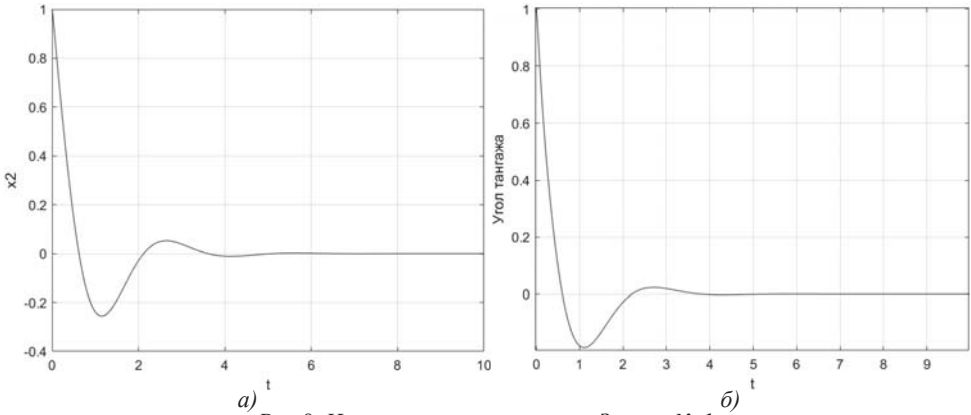


Рис.8. Изменение угла тангажа. Запуск № 1:

а – субоптимальный регулятор по выходу, б – H^∞ -регулятор

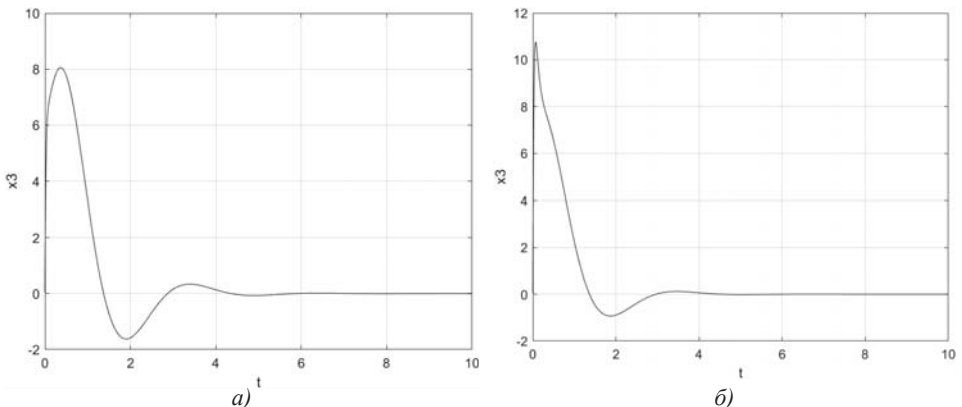


Рис.9. Изменение угла поворота привода. Запуск № 1:

а – субоптимальный регулятор по выходу, б – H^∞ -регулятор

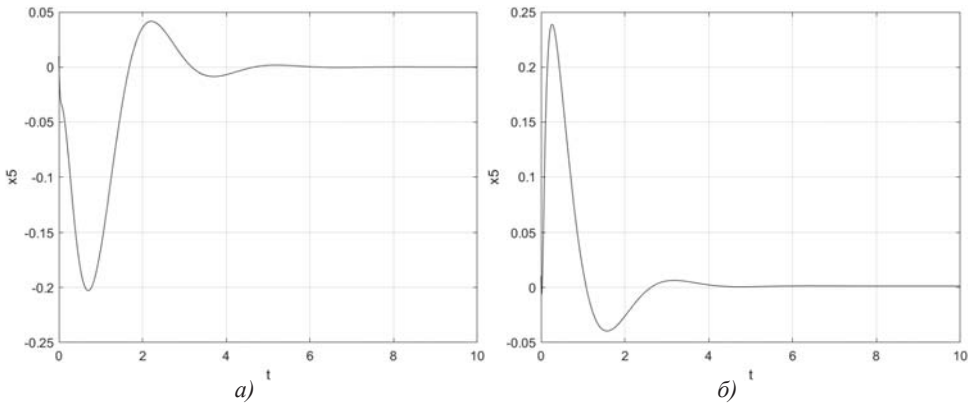


Рис. 10. Изменение ошибки обработки входного сигнала. Запуск № 1:
а – субоптимальный регулятор по выходу, б – H^∞ -регулятор

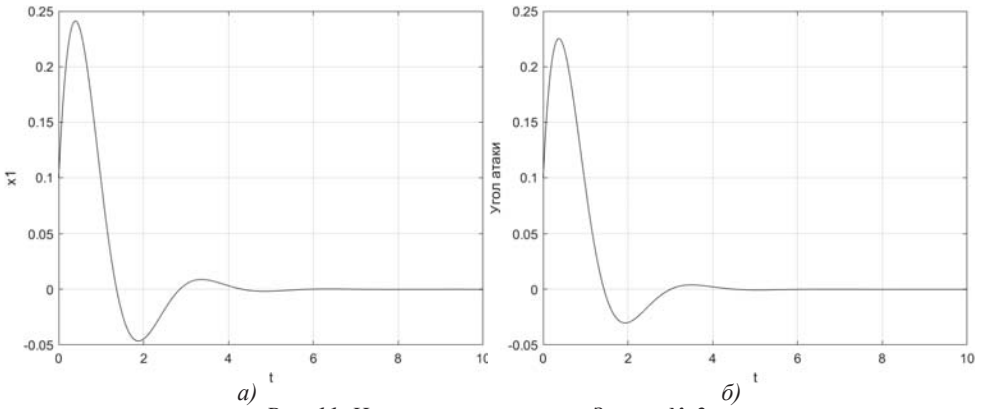


Рис. 11. Изменение угла атаки. Запуск № 2:
а – субоптимальный регулятор по выходу, б – H^∞ -регулятор

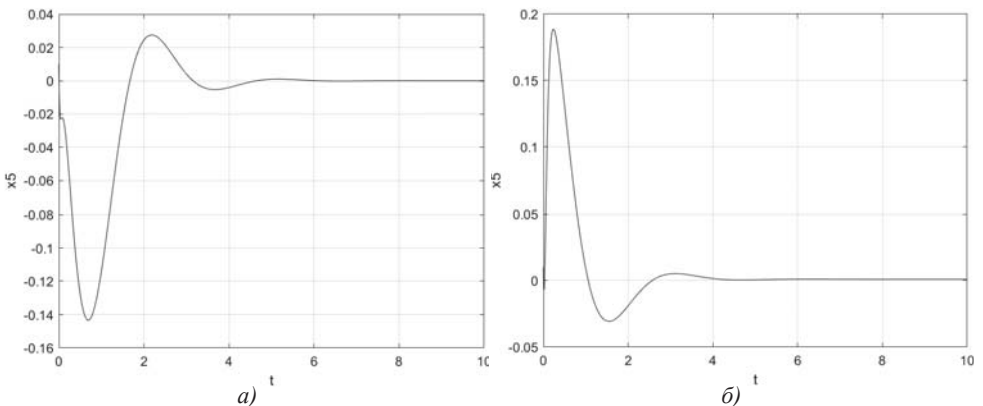


Рис. 12. Изменение ошибки обработки входного сигнала. Запуск № 2:
а – субоптимальный регулятор по выходу, б – H^∞ -регулятор

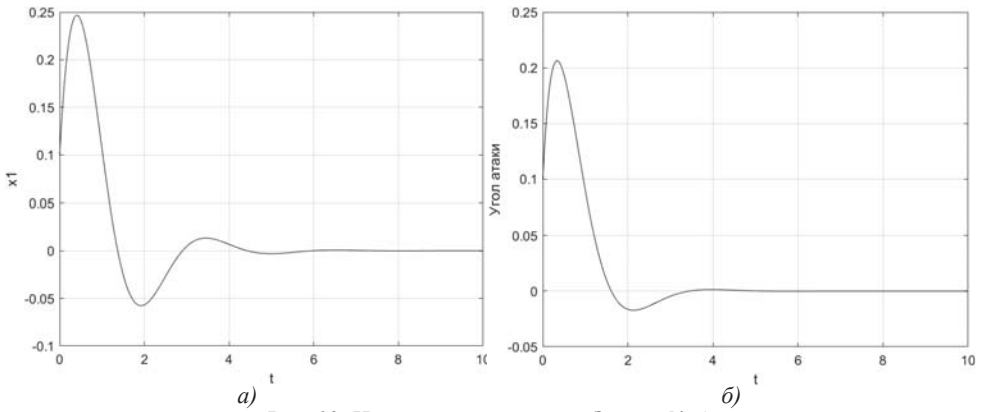


Рис. 13. Изменение угла атаки. Запуск № 4:

а – субоптимальный регулятор по выходу, б – H^∞ -регулятор

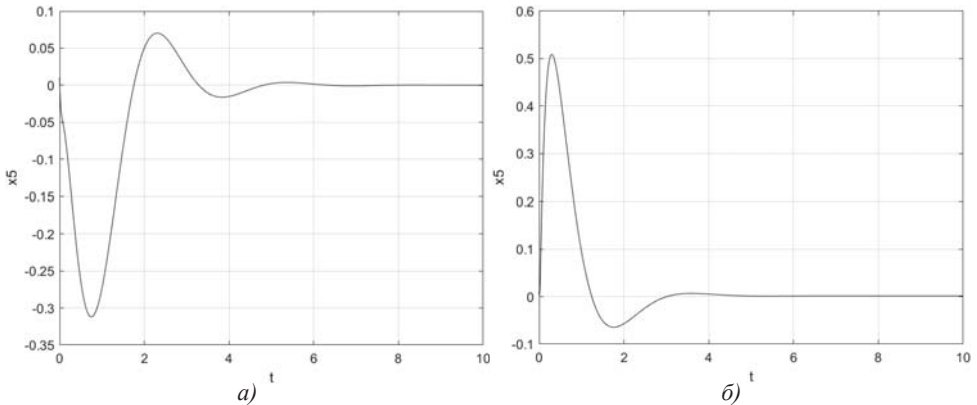


Рис. 14. Изменение ошибки обработки входного сигнала. Запуск № 2:

а – субоптимальный регулятор по выходу, б – H^∞ -регулятор

В работе проанализировано влияние ступенчатых возмущений вида $d(t) = \alpha \cdot 1(t - \beta)$, $\alpha \in [-2, 2]$, $\beta \geq 0$, на поведение переходных процессов (рис. 15–17).

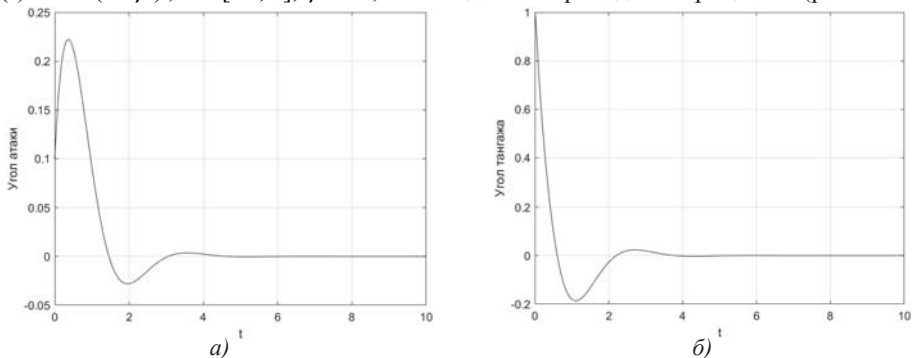


Рис. 15. Изменение параметров вектора состояния. Запуск при $d(t) = 2 \cdot 1(t)$:

а – угол атаки, б – угол тангажа

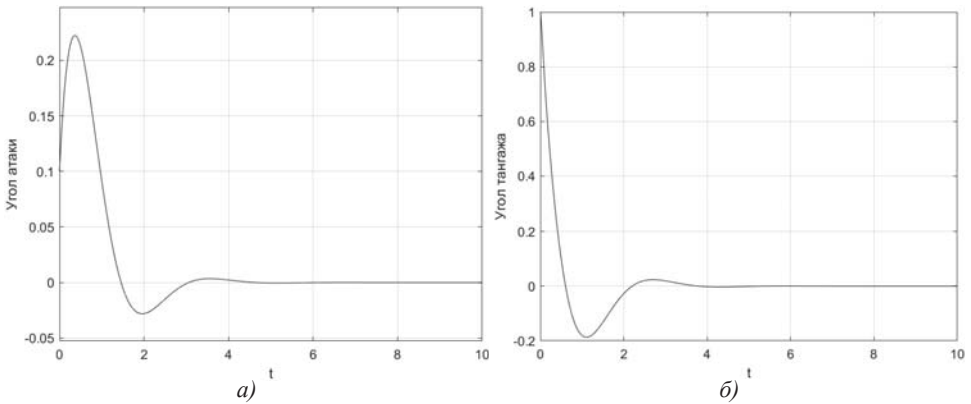


Рис. 16. Изменение параметров вектора состояния. Запуск при $d(t) = -2 * 1(t)$:
 a – угол атаки, b – угол тангажа

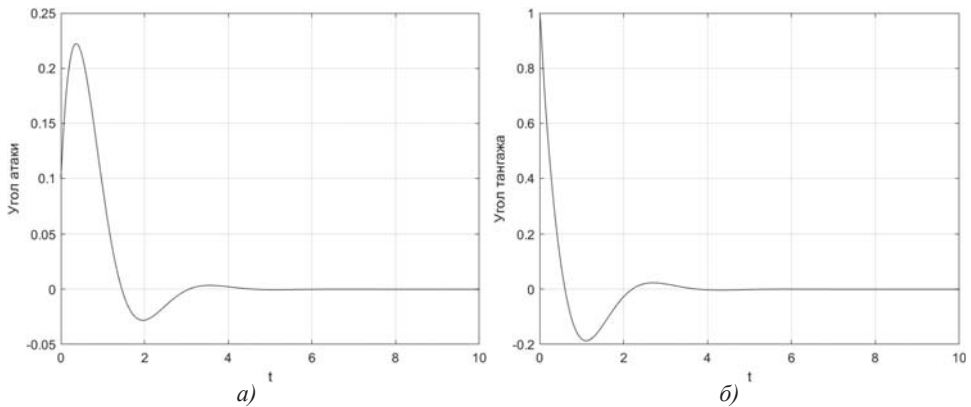


Рис. 17. Изменение параметров вектора состояния. Запуск при $d(t) = 1(t-1)$:
 a – угол атаки, b – угол тангажа

Анализ графиков переходных процессов свидетельствует о том, что задачи синтеза субоптимального регулятора по выходу и синтеза H^∞ -регулятора порождают в целом сравнимые результаты, наблюдаемые при изменении, например, угла атаки или угла тангажа. Достаточно большое влияние оказывают величины элементов матриц Q, S в критерии качества. В рассмотренных случаях прослеживается тенденция уменьшения значений координат вектора состояния $x(t)$ при уменьшении значения критерия. В рассмотренных случаях прослеживается тенденция уменьшения значений координат вектора состояния при уменьшении значения критерия. В то же время при значительном увеличении значения критерия наблюдается уменьшение значений координат вектора $x(t)$ только в задаче синтеза H^∞ -регулятора. При рассмотрении различных значений внешнего возмущения $d(t)$ не наблюдается значительных изменений в поведении состояния системы. С одной стороны, это может свидетельствовать о робастности системы и о правильном подборе её параметров,



при которых для любых возмущений она сохраняет свойство устойчивости, однако с другой стороны, это свидетельствует о необходимости дальнейших исследований влияния параметров на свойства синтезируемой замкнутой системы.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что реализованные алгоритмы синтеза линейных регуляторов позволяют обеспечить желаемое качество переходных процессов и асимптотическую устойчивость замкнутой системы. Применение H^∞ -управления позволяет эффективно погасить влияние ограниченных внешних возмущений на систему.

Литература

1. *J. Gadewadikar, F.L. Lewis, Murad Abu-Khalaf.* Necessary and Sufficient Conditions for H^∞ Static Output-Feedback Control // *Journal of Guidance, Control and Dynamics.* Vol.29, No. 4, 2006.
2. *Пантелеев А.В., Бортакровский А.С.* Теория управления в примерах и задачах.– М.: ИНФРА-М, 2016.
3. *Б.Т. Поляк, П.С. Щербаков.* Робастная устойчивость и управление.– М.: Наука, 2002.
4. *Skogestad S., Postlethwaite I.* Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. – John Wiley and sons, 2005.
5. *Е.И. Веремей.* Линейные системы с обратной связью: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013.
6. *Бортакровский А.С., Пантелеев А.В.* Линейная алгебра в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 2010.



Comparative Efficiency Analysis of Linear Suboptimal Controllers for Dynamic Systems with Incomplete Measurements

Pantelev A.V.*

Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia,
e-mail: avpantelev@inbox.ru

Yakovleva A.A.**

Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia,
e-mail: ayakovleva982@gmail.com

The article presents a comparative analysis of linear stationary controllers' efficiency. Algorithms of output regulator synthesis and finding of H^∞ control are presented. A complex of programs based on the stated algorithms, which allows to find an suboptimal control of dynamic systems and to simulate the process on a stated time interval for getting full information about the ongoing process for further analysis of its stability, was developed in the MATLAB environment.

Keywords: linear regulator, H^∞ -control, closed loop control, airplane stabilization, algorithm, software.

References

1. J. Gadewadikar, F.L. Lewis, Murad Abu-Khalaf. Necessary and Sufficient Conditions for H-infinity Static Output-Feedback Control. Journal of Guidance, Control and Dynamics. Vol.29, No. 4, 2006.
2. Pantelev A.V., Bortakovskiy A.S. Teoriya upravleniya v primerah i zadachah [Control Theory in Examples and Tasks]. – Moscow: INFRA-M Publ., 2016.
3. Polyak B.T., Scherbakov P.S. Robastnaya ustojchivost' i upravlenie [Robust stability and control]. – Moscow: Nauka Publ., 2002.
4. Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. – John Wiley and sons, 2005.
5. Veremey E.I. Linejnye sistemy s obratnoj svyaz'yu: Uchebnoe posobie [Linear Systems with Feedback]. – St. Petersburg: «Lan'» Publ., 2013.
6. Bortakovskiy A.S., Pantelev A.V. Linejnaya algebra v primerah i zadachah [Linear Algebra in Examples and Tasks]. – Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2010.

For citation:

Pantelev A.V., Yakovleva A.A. Comparative Efficiency Analysis of Linear Suboptimal Controllers for Dynamic Systems with Incomplete Measurements. *Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis*, 2020. Vol. 10, no. 1, pp. 96–109. DOI: 10.17759/mda.2020100106 (In Russ., abstr. In Engl.)

***Pantelev Andrei Vladimirovich**, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Full Professor, Head of the Department of Mathematics and Cybernetics, Institute of Information Technology and Applied Mathematics, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia, e-mail: avpantelev@inbox.ru

****Yakovleva Aleksandra Alekseevna**, Master Student, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia, e-mail: ayakovleva982@gmail.com

◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇ **МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ** ◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇

УДК 519.85

**Алгоритмизация и программная
реализация метода исключения переменных
в полиномиальных задачах оптимизации**

Нефедов В.Н.*

МАИ, Москва, Россия,
e-mail: nefedovvn54@yandex.ru

Жарких А.В.**

МАИ, Москва, Россия,
e-mail: alexvzhar@gmail.com

Рассматривается метод последовательного исключения переменных в полиномиальных задачах оптимизации. Приводится ряд задач, решаемых с помощью этого метода. Описываются практически реализуемые шаги алгоритма, который сводит исходную полиномиальную задачу оптимизации к многоэтапному ветвящемуся процессу получения конечного числа альтернативных задач, на выходе которого получается конечная совокупность многочленов от одной переменной. В результате решение ряда полиномиальных задач сводится к перебору конечного числа векторов, компоненты которых являются действительными корнями многочленов.

Ключевые слова: полиномы, исключение переменных, задачи оптимизации, системы алгебраических уравнений.

Для цитаты:

Нефедов В.Н., Жарких А.В. Алгоритмизация и программная реализация метода исключения переменных в полиномиальных задачах оптимизации // Моделирование и анализ данных. 2020. Том 10. № 1. С. 110–128. DOI: 10.17759/mda.2020100107

***Нефедов Виктор Николаевич**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математической кибернетики, Московский авиационный институт (МАИ), Москва, Россия, e-mail: nefedovvn54@yandex.ru

****Жарких Алексей Владимирович**, студент магистратуры факультета информационных технологий и прикладной математики, Московский авиационный институт (МАИ), Москва, Россия, e-mail: alexvzhar@gmail.com

1. ВВЕДЕНИЕ

В математическом программировании традиционно выделяются некоторые разделы (линейное, квадратичное, выпуклое программирование и т.д.), в которых используются специальные методы, развита специальная теория нахождения либо точного, либо приближенного решения. В настоящей работе рассматривается задача полиномиального программирования, т.е. задача вида

$$p_0(x) \rightarrow \min \text{ (или max)}, \quad (1)$$

$$p_i(x) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, l_1, \quad p_j(x) = 0, \quad j = l_1 + 1, \dots, l, \quad (2)$$

где $x = (x_1, \dots, x_m) \in \mathbb{R}^m$, p_i – полиномы, \mathbb{R} – множество действительных чисел.

Будем рассматривать задачу (1), (2) в канонической форме:

$$x_i \rightarrow \text{extr} \text{ (т.е. либо min, либо max)}, \quad (3)$$

$$p_i(x) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, l, \quad (4)$$

к которой и будет применяться метод исключения переменных [1,2]. Задача (1), (2) может быть легко сведена к задаче вида (3), (4) введением дополнительных переменных и ограничений. Метод исключения переменных описывается в виде алгоритма, поэтому будем его также называть алгоритмом исключения переменных (АИП). Основная идея АИП заключается в следующем. За конечное число шагов строим конечное число многочленов от одной переменной x_i таких, что любое значение локального экстремума задачи (3), (4) является действительным корнем хотя бы одного из этих многочленов.

Замечание 1. Поскольку шаги алгоритма будут основаны на элементарных операциях над полиномами: сложении, умножении, дифференцировании, то коэффициенты многочленов, получаемых на выходе алгоритма, являются элементами того же кольца, что и коэффициенты в полиномах задачи (3), (4). Например, это может быть кольцо действительных, рациональных, целых чисел или кольцо многочленов (например, $\mathbb{R}[t]$, где $t \in \mathbb{R}$ – параметр).

Полиномиальные задачи оптимизации нередко возникают при решении практических задач (см. пример 1).

Пример 1. [3]. Пусть требуется спроектировать контейнер в форме прямоугольного параллелепипеда объемом $V = l \text{ м}^3$, причем желательно израсходовать на его изготовление как можно меньше материала. При постоянной толщине стенок последнее условие означает, что площадь полной поверхности контейнера должна быть минимальной. Если обозначить через x_1, x_2, x_3 длины ребер контейнера, то задача сведется к минимизации целевой функции $p_0(x_1, x_2, x_3) = 2(x_1x_2 + x_1x_3 + x_2x_3)$, являющейся полиномом, при одном полиномиальном ограничении $p_1(x_1, x_2, x_3) = x_1x_2x_3 - l = 0$, т.е. пришли к задаче вида (1), (2). Понятно, что выбор той или иной формы контейнера приведет к разнообразию подобных задач (например, это может быть цилиндр или сфера, обрезанная сверху и снизу и т.д.).

Работа алгоритма (АИП) основана на последовательном исключении переменных. Сначала исключается x_m , затем x_{m-1} и т.д. и на последнем этапе исключается x_2 .



На каждом шаге алгоритма имеем конечную систему альтернативных задач вида (3), (4) такую, что множество значений локального экстремума в исходной задаче является подмножеством множества значений локального экстремума в альтернативных задачах. Тогда после исключения последней переменной x_2 получаем конечное число многочленов от переменной x_1 , присутствующих в ограничениях альтернативных задач, зависящих только от x_1 . При этом любое значение локального экстремума задачи (3), (4) является действительным корнем хотя бы одного из этих многочленов.

2. ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ИСКЛЮЧЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ

Перечислим некоторые задачи, которые можно решать методом исключения переменных в задачах (3), (4). При этом потребуется процедура нахождения всех действительных корней многочленов. Последняя задача является хорошо изученной. В литературе подробно описаны методы ее решения (см., например, [4]), эффективно применяемые на практике.

Задача 1. Нахождение множества изолированных решений системы полиномиальных уравнений (4). Заметим, что любое изолированное решение системы (4) является точкой локального экстремума каждой переменной x_1, \dots, x_m на множестве решений системы (4). Простейшим способом решения задачи 1, использующим АИП, является следующий. Для каждой задачи $x_i \rightarrow \text{extr}$ на множестве решений системы (4), используя АИП, находим конечную совокупность многочленов от одной переменной x_i , а затем множество X_i , включающее в себя все действительные корни этих многочленов, где $i = 1, 2, \dots, m$. Затем подставляем каждый из наборов $(x_1, \dots, x_m) \in X_1 \times \dots \times X_m$ в систему (4) и отбираем в множество M те из них, которые удовлетворяют системе (4). В результате получим конечное множество M , включающее в себя все изолированные решения системы (4) и быть может некоторые другие. Если же множество решений системы (4) является конечным (а следовательно, все его решения изолированы), то M является совокупностью всех его решений.

Задача 2. Нахождение точки глобального экстремума в задаче \min (или \max) на множестве решений системы (4). Для решения этой задачи рассматриваем вспомогательную задачу (вида (3), (4))

$$u \rightarrow \text{extr}; u - p_0(x) = 0, p_i(x) = 0, i = 1, 2, \dots, l. \quad (5)$$

Используя АИП, находим U – конечное множество действительных корней многочленов, полученных в результате применения АИП к задаче (5), в которое входят все значения локального экстремума задачи (5). Затем перебираем числа из U в порядке возрастания, начиная с минимального. Для каждого очередного $u^o \in U$ рассматриваем последовательность альтернативных задач, которая привела к многочлену от переменной u , действительным корнем которого является u^i . Пусть этому многочлену предшествовала задача (результат последовательного исключения переменных x_m, \dots, x_2):

$$\begin{aligned} u &\rightarrow \text{extr} \\ g_i^{(1)}(u, x_1) &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, l_1, \end{aligned} \quad (6)$$

где $g_i^{(1)}(u, x_1)$ – полиномы. Пусть далее задаче (6) предшествовала задача (результат последовательного исключения переменных x_m, \dots, x_3):

$$\begin{aligned} u &\rightarrow \text{extr} \\ g_i^{(2)}(u, x_1, x_2) &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, l_2 \end{aligned} \quad (7)$$

(где $g_i^{(2)}(u, x_1, x_2)$ – полиномы) и т.д., пока не дойдем до исходной задачи (5). После подстановки в систему уравнений (6) $u = u^o$ получим систему уравнений относительно одной неизвестной x_1 , решая которую, находим множество решений $X_1(u^o)$. Если $X_1(u^o) = \emptyset$, то переходим к следующему значению $u^o \in U$. В противном случае делаем подстановку $u = u^o, x_1 = x_1^o \in X_1(u^o)$ в систему уравнений задачи (7) и получаем систему уравнений относительно одной неизвестной x_2 , решая которую, находим конечное множество $X_2(u^o, x_1^o)$ ее решений. Если $X_2(u^o, x_1^o) = \emptyset$, то переходим к следующему $x_1^o \in X_1(u^o)$. Если для всех $x_1^o \in X_1(u^o)$ $X_2(u^o, x_1^o) = \emptyset$, то переходим к следующему $u^o \in U$. Пусть для некоторых очередных $u^o \in U, x_1^o \in X_1(u^o)$ $X_2(u^o, x_1^o) \neq \emptyset$. Тогда делаем подстановку $u = u_0, x_1 = x_1^o \in X_1(u^o), x_2 = x_2^o \in X_2(u^o, x_1^o)$ в систему уравнений для альтернативной задачи, предшествующей задаче (7) и т.д. Действуем так до тех пор, пока не найдем для текущего минимального $u^o \in U$ числа $x_1^o \in X_1(u^o), x_2^o \in X_2(u^o, x_1^o), \dots, x_m^o \in X_m(u^o, x_1^o, \dots, x_{m-1}^o)$, удовлетворяющие системе уравнений в (5). Найденное решение (x_1^o, \dots, x_m^o) и будет точкой глобального минимума в задаче (5) со значением глобального минимума u^o . Если же указанная процедура не даст результата ни при одном $u^o \in U$, то в задаче (5) отсутствуют точки локального, а следовательно, и глобального минимума.

Задача 3. Получение ответа на вопрос, является ли система полиномиальных уравнений (4) совместной и в случае ее совместности – нахождение одного из ее решений. Эта задача сводится к предыдущей при $p_0(x) = x_1^2 + \dots + x_m^2$.

Кроме того, АИП применялся в математической экологии для исследования матриц на D -Устойчивость (см. [5,6]).

Следует отметить, что метод исключения переменных был описан в работе [7] также для случая, когда в задаче (3), (4) $p_i(x), i = 1, 2, \dots, l$, – произвольные аналитические функции и был применен в этой работе для получения необходимых и достаточных условий локального минимума в аналитических задачах оптимизации (а также необходимых и достаточных условий разрешимости этой задачи).

Замечание 2. Для решения некоторых полиномиальных задач может быть применен алгоритм Бухбергера, позволяющий за конечное число практически реализуемых шагов находить минимальный редуцированный базис Гребнера идеала, порожденного совокупностью полиномов $p_1(x), \dots, p_l(x)$ (см. [8,9]). В частности, такой подход может быть эффективно использован для нахождения множества изолированных решений системы полиномиальных уравнений (4). Однако, наиболее значимые результаты получены (при таком подходе) для случая, когда основным полем является алгебраически замкнутое поле комплексных чисел, а в настоящей работе основным полем является



поле действительных чисел (не являющееся алгебраически замкнутым). Следующий пример показывает существенное отличие в использовании этих двух полей.

Пример 2. Рассмотрим уравнение

$$p(x_1, x_2, x_3) = (x_1 - 1)^2 + (x_2 - 2)^4 + (x_3 - 3)^6 = 0.$$

Это уравнение имеет в поле действительных чисел единственное решение $(x_1^o, x_2^o, x_3^o) = (1, 2, 3)$, которое легко может быть найдено с помощью АИП. Если же рассматривать это уравнение в поле комплексных чисел, то оно будет иметь бесконечное множество решений и решение $(1, 2, 3)$ не будет являться изолированным. Кроме того, минимальным редуцированным базисом Гребнера идеала, порожденно-го полиномом $p(x_1, x_2, x_3)$, будет сам этот полином, т.е. рассмотрение этого базиса даже в таком простейшем примере не даст какого-либо упрощения решаемой задачи.

3. АЛГОРИТМ ИСКЛЮЧЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ В ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ

Метод исключения переменных базируется на следующих простых утверждениях.

Лемма 1. Пусть $l = 1$, x^o – точка локального экстремума в задаче (3), (4). Тогда $\left. \frac{\partial p_i}{\partial x_i} \right|_{x^o} = 0$, $i = 2, \dots, m$.

Лемма 2. Пусть x^o – точка локального экстремума в задаче (3), (4), $q_1(x), \dots, q_l(x)$ – полиномы, $q_1(x^o) \neq 0$, $\tilde{p}_1(x) = q_1(x)p_1(x) + \dots + q_l(x)p_l(x)$. Тогда

x^o – точка локального экстремума в задаче (3), (4) при $p_1(x) = \tilde{p}_1(x)$.

Лемма 3. Пусть $x^o = (x_1^o, \dots, x_m^o)$ – точка локального экстремума в задаче (3), (4) и $p_i(x) = p_i(x_1, \dots, x_{m-1})$, $i = 2, \dots, l$ (т.е. все полиномы, кроме первого, не зависят от x_m).

Тогда, если $\left. \frac{\partial p_1}{\partial x_m} \right|_{x^o} \neq 0$, то $(x_1^o, \dots, x_{m-1}^o)$ – точка локального экстремума в задаче:

$$x_l \rightarrow \text{extr}; \quad p_i(x_1, \dots, x_{m-1}) = 0, \quad i = 2, \dots, l.$$

Лемма 4. Пусть $x^o \in X_0 \subseteq X \subseteq R^n$, функция $f(x)$ определена на множестве X , и x^o – точка ее локального экстремума на X . Тогда x^o – точка локального экстремума $f(x)$ на X_0 .

Введем теперь операцию R_1 элементарного понижения степени переменной x_m в полиноме

$$p(x) = p_{n_1}(\bar{x})x_m^{n_1} + p_{n_1-1}(\bar{x})x_m^{n_1-1} + \dots + p_0(\bar{x})$$

посредством полинома

$$q(x) = q_{n_2}(\bar{x})x_m^{n_2} + q_{n_2-1}(\bar{x})x_m^{n_2-1} + q_0(\bar{x}),$$

где $x \in R^m$, $\bar{x} = (x_1, \dots, x_{m-1})$, $m \geq 1$, $p_0(\bar{x}), \dots, p_{n_1}(\bar{x})$, $q_0(\bar{x}), \dots, q_{n_2}(\bar{x})$ – полиномы относительно переменных x_1, \dots, x_{m-1} , $p_{n_1}(\bar{x}) \neq 0$, $q_{n_2}(\bar{x}) \neq 0$, $n_1 \geq n_2 \geq 1$. Результатом этой операции является полином:

$$R_1(p, q) = q_{n_2}(\bar{x})p(x) - x_m^{n_1-n_2} p_{n_1}(\bar{x})q(x).$$

Обозначим $\tilde{p}(x) = R_1(p, q)$. Тогда

$$\tilde{p}(x) = \tilde{p}_{n_1-1}(\bar{x})x_m^{n_1-1} + \dots + \tilde{p}_0(\bar{x}),$$

$$\text{где } \tilde{p}_i(\bar{x}) = \begin{cases} q_{n_2}(\bar{x})p_i(\bar{x}) & i = 0, 1, \dots, n_1 - n_2 - 1 & n_1 - n_2 \geq 1, \\ q_{n_2}(\bar{x})p_i(\bar{x}) - p_{n_1}(\bar{x})q_{i-(n_1-n_2)}(\bar{x}), & i = n_1 - n_2, \dots, n_1 - 1. \end{cases}$$

Таким образом, степень переменной x_m в полиноме $\tilde{p}(x)$ не превосходит $n_1 - 1$.

В случае $n_1 \geq n_2 + 1$ к полиномам $p(x)$, $q(x)$ может быть также применена операция R_2 двукратного элементарного понижения степени переменной x_m в полиноме $p(x)$ посредством полинома $q(x)$, определяемая равенством $R_2(p, q) = R_1(R_1(p, q), q)$. Заметим, что степень переменной x_m в полиноме $\tilde{\tilde{p}}(x) = R_2(p, q)$ не превосходит $n_1 - 2$. Совершенно аналогично можно ввести операцию трехкратного, ..., $(n_1 - n_2 + 1)$ -кратного элементарного понижения степени переменной x_m в полиноме $p(x)$ посредством полинома $q(x)$, которые будем обозначать через $R_3, \dots, R_{n_1-n_2+1}$, соответственно. При этом степень переменных x_m в полиноме $R_j(p, q)$, где $1 \leq j \leq n_1 - n_2 + 1$, не превосходит $n_1 - j$.

Введенную операцию обобщим и на случай, когда $0 \leq n_1 < n_2$ (т.е. даже допустимо, чтобы полином $p(x)$ вообще не зависел от переменной x_m); при этом полагаем $R_1(p, q) = p$, а следовательно, в этом случае $\forall k \in \mathbb{N} \quad R_k(p, q) = p$.

Пример 3. Пусть $m = 2$, $x_1 = x$, $x_2 = y$,

$$p(x, y) = (x+1)y^3 - 4x^2y^2 + 3x^3y + 5, \quad q(x, y) = x^2y^2 - (3x+1)y - x^2 + 2.$$

$$R_1(p, q) = x^2p(x, y) - y(x+1)q(x, y) = x^2(x+1)y^3 - 4x^4y^2 + 3x^5y + 5x^2 -$$

$$\text{Тогда } -x^2(x+1)y^3 + (3x+1)(x+1)y^2 + x^2(x+1)y - 2(x+1)y = (-4x^4 + 3x^2 + 4x+1)y^2 + (3x^5 + x^3 + x^2 - 2x - 2)y + 5x^2,$$

$$R_2(p, q) = R_1(R_1(p, q)) = x^2R_1(p, q) - (-4x^4 + 3x^2 + 4x+1)q(x, y) =$$

$$= (3x^7 - 11x^5 - 3x^4 + 7x^3 + 13x^2 + 7x+1)y - 4x^6 + 11x^4 + 4x^3 - 5x^2 - 8x - 2.$$

Замечание 3. В дальнейшем операция R_1 будет применяться в АИП многократно с целью исключения переменной x_m (а затем и других переменных помимо x_1) из альтернативных задач. При этом степени остальных переменных могут быстро расти. Чтобы по возможности уменьшить скорость этого роста, можно дополнительно модифицировать операцию R_1 следующим образом. Если $g(\bar{x}) = \text{НОД}(p_{n_1}(\bar{x}), q_{n_2}(\bar{x})) \neq 1$, $p_{n_1}(\bar{x}) = \tilde{p}_{n_1}(\bar{x})g(\bar{x})$, $q_{n_2}(\bar{x}) = \tilde{q}_{n_2}(\bar{x})g(\bar{x})$, то полагаем $R_1(p, q) = \tilde{q}_{n_2}(\bar{x})p(x) - x_m^{n_1-n_2}\tilde{p}_{n_1}(\bar{x})q(x)$. Тогда в приведенных выше формулах для $\tilde{p}_i(\bar{x})$ следует заменить $q_{n_2}(\bar{x})$, $p_{n_1}(\bar{x})$ на $\tilde{q}_{n_2}(\bar{x})$, $\tilde{p}_{n_1}(\bar{x})$, соответственно.

Используя приведенные выше леммы 1–4, а также оператор R_1 (понижения степени переменной x_m), опишем вспомогательный для АИП алгоритм исключения переменной x_m из задачи (3), (4), т.е. алгоритм перехода от задачи (3), (4) к конечной совокупности альтернативных задач того же вида, в которых отсутствует переменная x_m и множество значений локального экстремума в задаче (3), (4) является подмножеством множества значений локального экстремума в альтернативных задачах.



Этот алгоритм основан на многоэтапном ветвящемся процессе применения нескольких простых переходов от каждой текущей альтернативной задачи к двум (или в одном случае – к одной) новым альтернативным задачам. При этом получена оценка для максимально возможного числа таких переходов, чтобы добиться исключения из альтернативных задач переменной x_m .

Чтобы сделать рассуждения более наглядными, рассмотрим случай, когда $m = 3$, $x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$, т.е. имеем задачу

$$x \rightarrow \text{extr}; p_i(x, y, z) = 0, i = 1, 2, \dots, l. \quad (8)$$

Опишем алгоритм перехода от задачи (8) к нескольким альтернативным задачам того же вида и таким, что множество значений локального экстремума в задаче (8) содержится в множестве значений локального экстремума в альтернативных задачах, и в этих альтернативных задачах отсутствует переменная z .

Будем под степенью переменной z в задаче вида (8) понимать максимальную степень этой переменной в полиномах $p_i(x, y, z)$, $i = 1, 2, \dots, l$.

В соответствии с леммами 1–3 будем рассматривать следующие три случая.

Случай 1. Пусть $l = 1$, т.е. задача (8) имеет вид

$$x \rightarrow \text{extr}; p(x, y, z) = 0, \quad (9)$$

и степень переменной z в полиноме $p(x, y, z)$ равна $n \geq 1$. Воспользовавшись леммой 1, получаем, что для любой точки $(x^0, y^0, z^0) \in R^3$, являющейся точкой локального экстремума в задаче (9) выполняется $\frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{(x^0, y^0, z^0)} = 0$, а следовательно, в силу леммы 4 (x^0, y^0, z^0) является точкой локального экстремума в задаче

$$x \rightarrow \text{extr}; p(x, y, z) = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial z} = 0,$$

которая эквивалентна задаче

$$x \rightarrow \text{extr}; np - z \frac{\partial p}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

(у этих задач одинаковые допустимые множества возможных решений). Заметим, что степень переменной z в задаче (10) на единицу меньше, чем в исходной задаче (9) (см. также замечание 5).

Случай 2. Пусть $l > 1$ и переменная z входит только в одно ограничение, т.е. задача (8) имеет вид

$$x \rightarrow \text{extr}; p_1(x, y, z) = 0, p_i(x, y) = 0, i = 2, \dots, l. \quad (11)$$

Пусть далее степень переменной z полинома $p_1(x, y, z)$ равна n , где $n \geq 1$.

В этом случае в силу леммы 3 для любой точки (x^0, y^0, z^0) являющейся точкой локального экстремума в задаче (8), выполняется:

(α) либо $\frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{(x^0, y^0, z^0)} = 0$, и тогда в силу леммы 4 (x^0, y^0, z^0) – точка локального экстремума в задаче

$$x \rightarrow \text{extr}; p_1(x, y, z) = 0, \quad \frac{\partial p_1(x, y, z)}{\partial z} = 0, p_i(x, y) = 0, i = 2, \dots, l,$$

которая эквивалентна задаче

$$x \rightarrow \text{extr}; \quad np_1(x, y, z) - z \frac{\partial p_1(x, y, z)}{\partial z} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial p_1(x, y, z)}{\partial z} = 0, \quad p_i(x, y) = 0, \quad i = 2, \dots, l$$

(у этих задач одинаковые допустимые множества возможных решений), степень переменной z в которой на единицу меньше, чем в задаче (11) (см. замечание 4);

(β) либо $\left. \frac{\partial p}{\partial z} \right|_{(x^0, y^0, z^0)} \neq 0$, и тогда в силу леммы 3 (x^0, y^0) – точка локального экстремума в задаче

$$x \rightarrow \text{extr}; \quad p_i(x, y) = 0, \quad i = 2, \dots, l, \quad (13)$$

в которой переменная z полностью исключена.

Таким образом, в случае 2 от единственной задачи (11) перешли к двум альтернативным задачам (12), (13) таким, что любое значение локального экстремума в задаче (11) является значением локального экстремума хотя бы в одной из задач (12) или (13) и степень переменной z в этих задачах либо на единицу меньше, чем в исходной задаче (11), либо равна 0 (т.е. переменная z исключена).

Приведем теперь более конкретный вид системы (12), что будет использовано в дальнейшем. Пусть

$$p_1(x, y, z) = q_n(x, y)z^n + q_{n-1}(x, y)z^{n-1} + \dots + q_1(x, y)z + q_0(x, y).$$

Тогда

$$\frac{\partial p_1}{\partial z} = nq_n(x, y)z^{n-1} + (n-1)q_{n-1}(x, y)z^{n-2} + \dots + 2q_2(x, y)z + q_1(x, y),$$

$$np_1 - z \frac{\partial p_1}{\partial z} = (n-n)q_n(x, y)z^n + [n-(n-1)]q_{n-1}(x, y)z^{n-1} +$$

$$+[n-(n-2)]q_{n-2}(x, y)z^{n-2} + \dots + (n-1)q_1(x, y)z + nq_0(x, y) =$$

$$= q_{n-1}(x, y)z^{n-1} + 2q_{n-2}(x, y)z^{n-2} + \dots + (n-1)q_1(x, y)z + nq_0(x, y),$$

а, следовательно, задача (12) имеет вид

$$x \rightarrow \text{extr}; \quad p_i(x, y) = 0, \quad i = 2, \dots, l,$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial z} = nq_n(x, y)z^{n-1} + (n-1)q_{n-1}(x, y)z^{n-2} + \dots + 2q_2(x, y)z + q_1(x, y) = 0, \quad (14)$$

$$np_1 - z \frac{\partial p_1}{\partial z} = q_{n-1}(x, y)z^{n-1} + 2q_{n-2}(x, y)z^{n-2} + \dots + (n-1)q_1(x, y)z + nq_0(x, y) = 0.$$

Будем переход от задачи (11) к альтернативной задаче (12) (или более конкретно – к задаче (14)) называть α -переходом, а переход к альтернативной задаче (13) – β -переходом. Заметим, что в случае 1 переход от задачи (9) к задаче (10) также является тем же α -переходом.

Замечание 4. Рассмотрим также в случае 2 возможный под случай, когда для полинома $p_1(x, y, z)$ выполняется



$$n \geq 2, q_1(x, y) \equiv 0, \dots, q_{n-1}(x, y) \equiv 0. \quad (15)$$

Тогда задача (14), полученная в результате α -перехода от задачи (11), имеет вид $x \rightarrow extr; p_i(x, y) = 0, i = 2, \dots, l, q_n(x, y)z^{n-1} = 0, q_0(x, y) = 0$.

Пусть (x^0, y^0, z^0) – произвольная точка локального экстремума в этой задаче.

Тогда

$(\alpha\alpha)$ либо $q_n(x^0, y^0) = 0$, и тогда в силу леммы 4 (x^0, y^0, z^0) – точка локального экстремума в задаче

$$x \rightarrow extr; p_i(x, y) = 0, i = 2, \dots, l, q_n(x, y)z^{n-1} = 0, q_n(x, y) = 0, q_0(x, y) = 0,$$

очевидно, не зависящей от переменной z и эквивалентной задаче

$$x \rightarrow extr; p_i(x, y) = 0, i = 2, \dots, l, q_n(x, y) = 0, q_0(x, y) = 0, \quad (16)$$

в которой (x^0, y^0) является точкой локального экстремума;

$(\alpha\beta)$ либо $q_n(x^0, y^0) \neq 0$, и тогда $z^0 = 0$, а (x^0, y^0) – точка локального экстремума в задаче

$$x \rightarrow extr; p_i(x, y) = 0, i = 2, \dots, l, q_0(x, y) = 0. \quad (17)$$

Будем переход от задачи (11), удовлетворяющей (15), к задаче (16) называть $\alpha\alpha$ -переходом, а к задаче (17) – $\alpha\beta$ -переходом. При этом (16), (17) – задачи с исключенной переменной z . Таким образом, в случае 2 при выполнении (15) вместо α -перехода рассматриваем два перехода: $\alpha\alpha$ и $\alpha\beta$.

Замечание 5. В случае 2 при степени z в полиноме $p_1(x, y, z)$, равной 1, в любой из альтернативных задач (12) или (13) переменная z полностью исключена. Совершенно аналогично в случае 1, если степень переменной z в полиноме $p(x, y, z)$ равна 1, то в единственной для этого случая альтернативной задаче (10) переменная z отсутствует, т.е. исключена. Кроме того, если в случае 2 выполняется дополнительное условие (15), то в любой из альтернативных задач: (13) (после β -перехода), (16) (после $\alpha\alpha$ -перехода), (17) (после $\alpha\beta$ -перехода) переменная z исключена.

Замечание 6. Уже в случаях 1, 2 в задаче (10) (для случая 1) и в задачах (12), (13) (для случая 2) могут появиться значения локального экстремума, отсутствующие в исходной задаче (8), но мы изначально и не рассчитывали на равенство множества значений локального экстремума в исходной задаче и в объединении множеств значений локального экстремума в альтернативных задачах.

Пример 4. Рассмотрим задачу

$$x \rightarrow extr; x - y^3 = 0.$$

В этой задаче нет точек локального экстремума, т.к. множеством возможных решений является совокупность пар (x, y) , где $x = y^3$, $y \in \mathbb{R}$, а функция y^3 не имеет точек локального экстремума на \mathbb{R} . С другой стороны, эта задача соответствует случаю 1 (но с меньшим количеством переменных). И в этом случае мы рассматриваем альтернативную задачу

$$x \rightarrow extr; 3(x - y^3) - y \frac{\partial}{\partial y}(x - y^3) = 0, \frac{\partial}{\partial y}(x - y^3) = 0,$$

т.е. задачу

$$x \rightarrow extr; 3x = 0, -3y^2 = 0,$$

имеющую одно значение локального экстремума, равное 0.

Случай 3. Пусть в задаче (8) $l \geq 2$, положительную степень переменной z имеют $k \geq 2$ полиномов из $p_i(x, y, z)$, $i = 1, \dots, l$, и максимальная степень переменной z в этих полиномах равна $n \geq 1$. Кроме того, пусть для определенности переменная z входит в $p_i(x, y, z)$ с наименьшей положительной степенью n_i (см. замечание 7 о возможности однозначного выбора полинома $p_i(x, y, z)$), где $1 \leq n_i \leq n$, т.е.

$$p_i(x, y, z) = p_{1,n_i}(x, y)z^{n_i} + p_{1,n_i-1}(x, y)z^{n_i-1} + \dots + p_{1,1}(x, y)z + p_{1,0}(x, y),$$

$$p_{1,n_i}(x, y) \neq 0.$$

Пусть далее (x^o, y^o, z^o) – произвольная точка локального экстремума в задаче (8). Тогда выполняется:

(γ) либо $p_{1,n_i}(x^o, y^o) \neq 0$, и тогда в силу леммы 2 (x^o, y^o, z^o) – точка локального экстремума в задаче

$$x_1 \rightarrow \text{extr}; p_1(x, y, z) = 0, \tilde{p}_i(x, y, z) = R_{n-n_i+1}(p_i, p_1) = 0, i = 2, \dots, l \quad (18)$$

(здесь операция R_{n-n_i+1} применяется в отмеченном ранее обобщенном смысле, так что она оставляет без изменения полиномы, не зависящие от z , а также со степенью переменной z , меньшей n_i , а все полиномы со степенью, большей или равной n_i , преобразует в полиномы со степенью, меньшей или равной $n_i - 1$);

(δ) либо $p_{1,n_i}(x^o, y^o) = 0$, и тогда в силу леммы 4 (x^o, y^o, z^o) – точка локального экстремума в задаче

$$x_1 \rightarrow \text{extr}; \tilde{p}_1(x, y, z) = p_{1,n_i-1}(x, y)z^{n_i-1} + \dots + p_{1,1}(x, y)z + p_{1,0}(x, y) = 0,$$

$$p_{1,n_i}(x, y) = 0, p_i(x, y, z) = 0, i = 2, \dots, l. \quad (19)$$

Будем переход от исходной задачи (8) в рассматриваемом случае 3 к альтернативной задаче (18) называть γ -переходом, а к альтернативной задаче (19) – δ -переходом.

Итак, в рассматриваемом случае 3 действуем следующим образом. Осуществляем оба перехода, т.е. γ -переход и δ -переход от исходной задачи (8) к двум альтернативным задачам вида (8), каждая из которых снова соответствует одному из перечисленных трех случаев.

Таким образом, в каждом из случаев 1–3 осуществляем переход от исходной задачи (8) к новым альтернативным задачам вида (8) (к одной – в случае 1, к двум или трем в случае 2 и к двум в случае 3), от которых в свою очередь можем перейти к новым альтернативным задачам и т.д., т.е. можем организовать процесс многоэтапного ветвления исходной задачи (8) на множество альтернативных задач того же вида (т.е. вида (8)). При этом на каждом этапе этого процесса (в силу выбора в каждом из трех случаев соответствующих альтернативных задач) имеем конечную совокупность альтернативных задач таких, что объединение множеств значений локального экстремума в этих задачах содержит множество значений локального экстремума в исходной задаче (8). Целью этого многоэтапного процесса является получение совокупности альтернативных задач с исключенной переменной z . Аналогичный процесс позволит затем исключить переменную y , и мы получим совокупность альтернативных задач вида (8) с одной переменной x , т.е. задач вида

$$x \rightarrow \text{extr}; p_i(x) = 0, i = 1, 2, \dots, l,$$



где $p_i(x)$ – многочлены, $i = 1, 2, \dots, l$. При этом множеством решений этой задачи является множество общих действительных корней многочленов $p_i(x)$, $i = 1, 2, \dots, l$, равное множеству действительных корней многочлена $p(x) = \text{НОД}(p_1(x), \dots, p_l(x))$

Замечание 7. Если имеется несколько полиномов с наименьшей положительной степенью переменной z , равной n_1 , то выбираем среди них полином с наименьшей степенью переменной y в полиноме $p_{1,n_1}(x, y)$ (чтобы минимизировать максимальную степень переменной y в альтернативных задачах, получаемых в результате исключения переменной z), а если и таких полиномов несколько, то выбираем среди них полином с наименьшей степенью x в полиноме $p_{1,n_1}(x, y)$ и т.д.

4. ОБОСНОВАНИЕ АИП

Покажем, что указанный процесс ветвления является конечным. Более того, получим оценку сверху для числа возможных переходов вида $\alpha, \beta, \alpha\alpha, \alpha\beta, \gamma, \delta$, чтобы из исходной задачи (8) в результате цепочки этих переходов получалась альтернативная задача с исключенной переменной z .

Нам понадобятся некоторые обозначения, связанные с задачей (8). Обозначим через n_i степень переменной z в полиноме $p_i(x, y, z)$, $i = 1, 2, \dots, l$, $n_\Sigma = \sum_{i=1}^l n_i$. Заметим, что для любого из случаев 1–3 $n_\Sigma > 0$. Пусть в ограничениях задачи (8) имеются $k \geq 1$ полиномов с положительной степенью переменной z и для простоты обозначений они расположены в ограничениях задачи (8) таким образом, что

$$1 \leq n_1 \leq \dots \leq n_k, 1 \leq k \leq l. \quad (20)$$

Приведем сначала следующую вспомогательную оценку для произвольного $k \geq 2$. Как будет показано далее (см. утверждение 4), для любой последовательности переходов вида γ или δ от задачи (8), удовлетворяющей (20) при $k \geq 2$, в результате не более $n_\Sigma - n_0$ таких переходов, где $1 \leq n_0 \leq n_k$, будет получена альтернативная задача, в которой переменная z будет либо отсутствовать, либо присутствовать только в одном ограничении с положительной степенью n_0 .

Для случая $k = 2$ приведем уточнение вспомогательной оценки, приведенной для произвольного $k \geq 2$. В этом случае (см. утверждение 6) для любой последовательности переходов вида γ или δ от задачи (8), удовлетворяющей (20) при $k = 2$, в результате не более n_1 таких переходов будет получена альтернативная задача, в которой переменная z будет либо отсутствовать, либо присутствовать только в одном ограничении с некоторой положительной степенью n_0 , где $1 \leq n_0 \leq n_2$.

Используя приведенные вспомогательные оценки, получим теперь некоторые оценки для числа переходов от задачи (8) к альтернативным задачам с исключенной переменной z . Будем задачу вида (8) с одним ограничением с положительной степенью переменной z , не превосходящей $n \in \mathbb{N}$, кратко называть $(1, n)$ -задачей, а задачу вида (8) с двумя ограничениями с положительными степенями переменной z , не превосходящими $n \in \mathbb{N}$, кратко называть $(2, n)$ -задачей.

Пусть сначала в задаче (8) условие (20) имеет вид

$$k = 2, 1 \leq n_1 \leq n_2 \leq n, \quad (21)$$

т.е. рассматривается произвольная $(2, n)$ -задача. Тогда согласно приведенной вспомогательной оценке (для $k = 2$) через $\leq n$ ($\gamma \vee \delta$)-переходов от задачи (8), удовлетворяющей (21), произведенных в любой последовательности, будет получена либо альтернативная задача без z , либо альтернативная $(1, n)$ -задача. От последней задачи $(\beta \vee \alpha\alpha \vee \alpha\beta)$ -переходы сразу дают задачу без z , а α -переход приводит к альтернативной $(2, n-1)$ -задаче. От $(2, n-1)$ -задачи согласно приведенной вспомогательной оценке (для $k = 2$) через $\leq n-1$ ($\gamma \vee \delta$)-переходов будет получена альтернативная $(1, n-1)$ -задача, от которой $(\beta \vee \alpha\alpha \vee \alpha\beta)$ -переходы сразу дают задачу без z , а α -переход приводит к альтернативной $(2, n-2)$ -задаче. От $(2, n-2)$ -задачи согласно приведенной вспомогательной оценке (для $k = 2$) через $\leq n-2$ ($\gamma \vee \delta$)-переходов будет получена альтернативная $(1, n-2)$ -задача, из которой $(\beta \vee \alpha\alpha \vee \alpha\beta)$ -переходы сразу дают задачу без z , а α -переход приводит к альтернативной $(2, n-3)$ -задаче и т.д. Из этих рассуждений следует, что для полного исключения переменной z из задачи (8) в случае (21) потребуется не более

$$n + (n-1) + (n-2) + \dots + 2 + 1 = n(n+1)/2$$

переходов вида γ или δ , а также не более n переходов вида $\alpha \vee \beta \vee \alpha\alpha \vee \alpha\beta$, т.е. в общей сложности не более $n(n+1)/2 + n$ переходов вида $\gamma \vee \delta \vee \alpha \vee \beta \vee \alpha\alpha \vee \alpha\beta$. Обозначим $N(2, n) = n(n+1)/2 + n$ – верхняя оценка для числа переходов от задачи (8), удовлетворяющей (21), к альтернативным задачам с исключенной переменной z . Очевидно, что $N(2, n)$ монотонно возрастает по переменной n .

Пусть далее в задаче (8) условие (20) имеет вид

$$k = 1, 1 \leq n_1 = n. \quad (22)$$

Тогда имеют место случаи 1 или 2. В случае 2 $(\beta \vee \alpha\alpha \vee \alpha\beta)$ -переходы сразу приводят к альтернативной задаче с исключенной переменной z . Если $n = 1$, то α -переход также приводит к альтернативной задаче с исключенной переменной z (см. замечание 5). Если $n \geq 2$, то α -переход приводит к альтернативной $(2, n-1)$ -задаче. Но тогда, учитывая рассмотренный ранее случай (21), получаем, что верхняя оценка $N(1, n)$ для числа переходов от задачи (8), удовлетворяющей (22), к альтернативным задачам с исключенной переменной z может вычисляться по формуле (в ней учтены все перечисленные случаи)

$$N(1, n) = 1 + N(2, n-1) = 1 + n(n-1)/2 + n-1 = n(n+1)/2.$$

Пусть теперь в задаче (8) условие (20) имеет вид

$$k \geq 3, 1 \leq n_1 \leq \dots \leq n_k = n, k \leq l. \quad (23)$$

Тогда, используя приведенную ранее вспомогательную оценку (для произвольного $k \geq 2$), получаем, что верхняя оценка $N(k, n)$ для числа переходов от задачи (8), удовлетворяющей (23), к альтернативным задачам с исключенной переменной z может вычисляться по формуле

$$N(k, n) = \max_{1 \leq n_0 \leq n} \{n_\Sigma - n_0 + N(1, n_0)\} = \max_{1 \leq n_0 \leq n} \{n_\Sigma - n_0 + n_0(n_0 + 1)/2\} =$$



$$= \max_{1 \leq n_0 \leq n} \{n_\Sigma + n_0(n_0 - 1) / 2\} = n_\Sigma + n(n - 1) / 2 \leq kn + n(n - 1) / 2 .$$

Заметим теперь, что во всех рассмотренных случаях (21) – (23) можем верхнюю оценку для числа переходов от задачи (8), к альтернативным задачам с исключенной переменной z вычислять по общей формуле

$$N(k, n) = kn + n(n - 1) / 2 . \quad (24)$$

Приведем теперь вспомогательные утверждения, которые нам потребовались для получения формулы (24).

Утверждение 1. Пусть задача (8) удовлетворяет введенному выше условию (20), $n_\Sigma = \sum_{i=1}^l n_i = \sum_{i=1}^k n_i$, $n = n_k$, $k \geq 2$ (т.е. эта задача относится к случаю 3). Тогда для задачи (18), полученной из (8) в результате γ -перехода, выполняется

$$\tilde{n}_\Sigma = \sum_{i=1}^l \tilde{n}_i \leq n_\Sigma - (k - 1) \leq n_\Sigma - 1 ,$$

где $\tilde{n}_1 = n_1$, \tilde{n}_i – степень переменной z в полиномах $\tilde{p}_i(x, y, z)$, $i = 2, \dots, l$.

Доказательство. По определению обобщенной операции R_j , где $j \in \mathbb{N}$, для степени \tilde{n}_i переменной z в полиноме $\tilde{p}_i(x, y, z) = R_{n_i - n_1 + 1}(p_i, p_1)$ выполняется: $\tilde{n}_i \leq n_1 - 1$, $i = 2, \dots, k$; $\tilde{n}_i = 0$, $i = k + 1, \dots, l$, откуда

$$\tilde{n}_\Sigma = \sum_{i=1}^l \tilde{n}_i = n_1 + \sum_{i=2}^k \tilde{n}_i \leq n_1 + \sum_{i=2}^k n_1 - (k - 1) = \sum_{i=1}^k n_1 - (k - 1) \leq n_\Sigma - (k - 1) \leq n_\Sigma - 1 .$$

Следствие 1. Пусть для задачи (8) имеет место случай 3. Тогда в результате γ -перехода от этой задачи к альтернативной задаче сумма степеней переменной z в полиномах, входящих в ограничения, уменьшается не менее, чем на 1.

Следующие утверждения очевидны (непосредственно следуют из определений переходов вида γ и δ).

Утверждение 2. Пусть для задачи (8) имеет место случай 3. Тогда в результате δ -перехода от этой задачи к альтернативной задаче (см. задачу (19)) сумма степеней переменной z в полиномах, входящих в ограничения, уменьшается не менее, чем на 1.

Утверждение 3. Пусть для задачи (8) имеет место случай 3. Тогда в результате γ -перехода или δ -перехода от этой задачи к альтернативной задаче количество ограничений k с положительной степенью переменной z , а также максимальная степень переменной z в этих ограничениях не увеличиваются.

Из утверждений 2, 3, а также следствия 1 получаем, что справедливо

Утверждение 4. Пусть для задачи (8), ограничения которой удовлетворяют (20), имеет место случай 3, т.е. $k \geq 2$. Тогда для любой последовательности переходов вида γ или δ от этой задачи в результате не более $n_\Sigma - n_0$ таких переходов, где $1 \leq n_0 \leq n_k$, будет получена альтернативная задача, в которой переменная z будет либо отсутствовать, либо присутствовать только в одном ограничении с положительной степенью n_0 .

Кроме того, нам понадобится следующее очевидное

Утверждение 5. Пусть для задачи (6), ограничения которой удовлетворяют (20), имеет место случай 3, т.е. $k \geq 2$. Тогда

- 1) если в задаче (18), полученной из (8) в результате γ -перехода, \tilde{k} – количество полиномов с положительной степенью переменной z , \tilde{n}_i – степени переменной z в полиномах $\tilde{p}_i(x, y, z)$, $i = 2, \dots, k$, то
 - а) в случае $\tilde{k} = 1$ единственным полиномом с положительной степенью переменной z является $p_1(x, y, z)$ и эта степень равна n_1 ;
 - б) в случае $\tilde{k} > 1$ минимальная положительная степень переменной z не превосходит $n_1 - 1$;
- 2) если в задаче (19), полученной из (8) в результате δ -перехода, \tilde{k} – количество полиномов с положительной степенью переменной z , то
 - в) в случае $\tilde{k} = k$ минимальная положительная степень переменной z в ограничениях задачи (19) не превосходит $n_1 - 1$;
 - г) в случае $\tilde{k} = k - 1$ (очевидно, что других случаев кроме $\tilde{k} = k$ или $\tilde{k} = k - 1$ быть не может, т.к. при δ -переходе меняется только одно ограничение с положительной степенью переменной z) минимальная положительная степень переменной z в ограничениях задачи (19) равна n_2 .

Введем следующее определение. Будем задачу (8), удовлетворяющую условиям (20), (21), называть $(2, \bar{n}_1, \bar{n}_2)$ -задачей, если

$$n_1 \leq \bar{n}_1, n_2 \leq \bar{n}_2, \bar{n}_1, \bar{n}_2 \in \mathbb{N}, \bar{n}_1 \leq \bar{n}_2.$$

Следствием утверждения 5 является

Утверждение 6. Пусть для задачи (8), ограничения которой удовлетворяют (20), имеет место случай 3, и при этом $k = 2$, т.е. выполняется (21). Тогда для любой последовательности переходов вида γ или δ в результате не более n_1 таких переходов будет получена альтернативная задача, в которой переменная z будет либо отсутствовать, либо присутствовать только в одном ограничении с некоторой положительной степенью n_0 , где $1 \leq n_0 \leq n_2$.

Доказательство. Заметим, что исходная задача является $(2, n_1, n_2)$ -задачей и в силу утверждения 5 после первого $(\gamma \vee \delta)$ -перехода от нее получим либо альтернативную $(1, n_2)$ -задачу (т.е. удовлетворяющую требованиям доказываемого утверждения), либо $(2, n_1 - 1, n_2)$ -задачу. Следующий $(\gamma \vee \delta)$ -переход от $(2, n_1 - 1, n_2)$ -задачи в силу утверждения 5 приведет либо к альтернативной $(1, n_2)$ -задаче (т.е. удовлетворяющей требованиям доказываемого утверждения), либо к $(2, n_1 - 2, n_2)$ -задаче и т.д. Из этих рассуждений становится очевидным, что после $\geq n_1$ $(\gamma \vee \delta)$ -переходов от исходной задачи получение в качестве альтернативной $(2, n_2)$ -задачи невозможно, а может быть получена только $(1, n_2)$ -задача.

5. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Для решения перечисленных в разделе 1 полиномиальных задач был разработан программный комплекс на высокоуровневом языке Python с использованием библиотеки SymPy, предназначенной для символьных вычислений. В этом программном комплексе используется алгоритм исключения переменных, для которого были реал-



лизованы операции перехода от канонической задачи полиномиальной оптимизации вида (3), (4) к альтернативным задачам.

На вход основной программы подается система полиномов, входящих в ограничения задачи вида (3), (4), после чего в соответствии со случаями 1–3, описанными в разделе 2, осуществляется переход к альтернативным задачам. При этом для каждой очередной альтернативной задачи запоминается информация о предшествующей ей задаче. Таким образом, осуществляется описанный в разделе 2 многоэтапный процесс ветвления, который завершается построением совокупности альтернативных задач, в ограничения которых входят многочлены от одной переменной. При этом для каждого из этих многочленов может быть восстановлена вся цепочка предшествующих ему (или порождающих его) альтернативных задач вида (3), (4), что позволяет последовательно находить значения неизвестных переменных.

Программное обеспечение АИП было реализовано для случая двух и трех переменных.

Пример 3. Программный комплекс был протестирован на следующем примере. Рассматривается задача (вида (8))

$$\begin{aligned} x &\rightarrow \text{extr}; p_1(x, y) = y^3 + 2xy^2 - 3xy + x - 1 = 0, \\ p_2(x, y) &= y^3 + x^3 - x^2y + y^2 - 2 = 0. \end{aligned} \quad (25)$$

Применим к задаче (25) АИП. Для этого построим цепочку переходов от задачи (25) к нескольким альтернативным задачам с исключенной переменной y . Задача (25) относится к случаю 3, поэтому осуществляем γ -переход (здесь δ -переход невозможен) от задачи (25) к альтернативной задаче (вида (18))

$$\begin{aligned} x &\rightarrow \text{extr}; p_1(x, y) = y^3 + 2xy^2 - 3xy + x - 1 = 0, \\ \tilde{p}_2(x, y) &= R_1(p_2, p_1) = p_2 - p_1 = y^2(-2x + 1) - y(x^2 - 3x) + x^3 - x - 1 = 0. \end{aligned} \quad (26)$$

Задача (26) (эквивалентная задаче (25)) также относится к случаю 3. Здесь возможны оба перехода: δ и γ . Альтернативной задачей, получаемой из (26) с помощью δ -перехода, является

$$\begin{aligned} x &\rightarrow \text{extr}; p_1(x, y) = y^3 + 2xy^2 - 3xy + x - 1 = 0, \\ -2x + 1 &= 0, -y(x^2 - 3x) + x^3 - x - 1 = 0. \end{aligned} \quad (27)$$

Из последних двух ограничений задачи (27) следует, что единственным ее решением является $x = 0.5$, $y = 1.1$, однако, это решение не удовлетворяет первому ограничению, т.е. задача (27) не имеет решений.

Альтернативной задачей, получаемой из (26) с помощью γ -перехода, является

$$\begin{aligned} x &\rightarrow \text{extr}; q_1(x, y) = R_2(p_1, \tilde{p}_2), \\ \tilde{p}_2(x, y) &= y^2(-2x + 1) - y(x^2 - 3x) + x^3 - x - 1 = 0. \end{aligned} \quad (28)$$

Заметим, что при этом

$$\begin{aligned} R_1(p_1, \tilde{p}_2) &= (-2x + 1)p_1 - y\tilde{p}_2 = \\ &= (-2x + 1)y^3 + 2(-2x + 1)xy^2 - 3(-2x + 1)xy + x(-2x + 1) + 2x - 1 - \\ &- y^3(-2x + 1) + y^2(x^2 - 3x) - yx^3 + yx + y = \\ &= y^2(-3x^2 - x) + y(-x^3 + 6x^2 - 2x + 1) - 2x^2 + 3x - 1 = 0, \end{aligned}$$



$q_1(x, y) = R_2(p_1, \tilde{p}_2) = R_1(R_1(p_1, \tilde{p}_2), \tilde{p}_2) = (-2x+1)R_1(p_1, \tilde{p}_2) - (-3x^2 - x)\tilde{p}_2 =$
 $= y(-x^4 - 5x^3 + 13x^2 - 4x + 1) + 3x^5 + x^4 + x^3 - 12x^2 + 4x - 1,$
 т.е. задача (28) имеет вид

$$\begin{aligned} x \rightarrow extr; \quad q_1(x, y) &= y(-x^4 - 5x^3 + 13x^2 - 4x + 1) + \\ &+ 3x^5 + x^4 + x^3 - 12x^2 + 4x - 1 = 0, \\ \tilde{p}_2(x, y) &= y^2(-2x + 1) - y(x^2 - 3x) + x^3 - x - 1 = 0. \end{aligned} \quad (29)$$

Задача (29) (эквивалентная задаче (25)) также относится к случаю 3. Здесь возможны оба перехода: δ и γ . Альтернативной задачей, получаемой из (29) с помощью δ -перехода, является

$$\begin{aligned} x \rightarrow extr; \quad -x^4 - 5x^3 + 13x^2 - 4x + 1 &= 0, \\ 3x^5 + x^4 + x^3 - 12x^2 + 4x - 1 &= 0, \\ \tilde{p}_2(x, y) &= y^2(-2x + 1) - y(x^2 - 3x) + x^3 - x - 1 = 0. \end{aligned} \quad (30)$$

Действительными корнями первого уравнения в (30) являются: 1.64595, -6.95486, а у второго единственный корень -1.29617 , т.е. задача (30) не имеет решений.

Альтернативной задачей, получаемой из (26) с помощью δ -перехода, является

$$\begin{aligned} x \rightarrow extr; \quad q_2(x, y) &= R_2(\tilde{p}_2, q_1), \\ q_1(x, y) &= y(-x^4 - 5x^3 + 13x^2 - 4x + 1) + 3x^5 + x^4 + x^3 - 12x^2 + 4x - 1 = 0, \end{aligned} \quad (31)$$

которая после соответствующих преобразований имеет вид
 $x \rightarrow extr;$

$$\begin{aligned} q_1(x, y) &= y(-x^4 - 5x^3 + 13x^2 - 4x + 1) + 3x^5 + x^4 + x^3 - 12x^2 + 4x - 1 = 0, \\ q_2(x, y) &= R_2(\tilde{p}_2, q_1) = -20x^{11} + 71x^9 - 77x^8 + 170x^7 - 328x^6 + 275x^5 - \\ &- 114x^4 + 26x^3 - 3x^2 = 0. \end{aligned} \quad (32)$$

Задача (32) относится уже к случаю 2. Здесь возможны два перехода: α и β . Заметим, что

$$\frac{\partial}{\partial y} q_1(x, y) = -x^4 - 5x^3 + 13x^2 - 4x + 1,$$

$$q_1(x, y) - \frac{\partial}{\partial y} q_1(x, y) = 3x^5 + x^4 + x^3 - 12x^2 + 4x - 1,$$

и при этом, как было показано при рассмотрении задачи (30), система

$$\frac{\partial}{\partial y} q_1(x, y) = -x^4 - 5x^3 + 13x^2 - 4x + 1 = 0,$$

$$q_1(x, y) - \frac{\partial}{\partial y} q_1(x, y) = 3x^5 + x^4 + x^3 - 12x^2 + 4x - 1 = 0,$$

не имеет решений. Но тогда и альтернативная задача, получаемая при α -переходе от задачи (32), не имеет решений. Альтернативной задачей, получаемой из (32) с помощью δ -перехода, является $x \rightarrow extr;$ $-20x^{11} + 71x^9 - 77x^8 + 170x^7 - 328x^6 + 275x^5 - 114x^4 + 26x^3 - 3x^2 = 0.$



Эта задача имеет решения (действительные корни единственного многочлена в ограничениях этой задачи): -2.69841961 , 1 , 1.28513433 , 0.5 , 0 . Подставляя найденные решения в систему ограничений исходной задачи (25) получаем множество точек локального экстремума этой задачи: $x = 0$, $y = 1$; $x = 1$, $y = 1$; $x = 1.28513433$, $y = 0.07815279$; $x = -2.69841961$, $y = 3.26360934$. Приведением системы полиномов в ограничениях задачи (25) к минимальному редуцированному базису Гребнера нетрудно убедиться, что эта система имеет конечное множество изолированных решений в поле комплексных чисел, а тем более и в поле действительных чисел, а, следовательно, найдено множество всех действительных решений системы равенств в задаче (25), т.е. полностью решена указанная в разделе 1 задача 1.

Литература

1. Нефедов В.Н. Метод исключения переменных в полиномиальных задачах оптимизации – Деп. в ВИНТИ, 1984, № 7590–84.
2. Нефедов В.Н. Полиномиальные задачи оптимизации // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1987. Т. 27. № 5. С. 661–675.
3. Губарь Ю.В. Введение в математическое программирование. – ИНТУИТ (национальный открытый университет), 2016. – 227 с.
4. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. – М.: Высшая школа, 2002. – 840 с.
5. Кановой Г.В., Логофет Д.О. D-Устойчивость матриц 4×4 // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1998. Т. 38. № 9. С. 1429–1435.
6. Logofet D.O. Stronger-than-Lyapunov notions of matrix stability, or how “flowers” help solve problems in mathematical ecology // *Linear Algebra Appl*, 398 (2005), 75–100.
7. Нефедов В.Н. Об одном достаточном условии экстремума для полиномов и степенных рядов – Деп. в ВИНТИ, 1990, № 2666-В90.
8. Бухбергер Б. Алгоритмический метод в теории полиномиальных идеалов // Компьютерная алгебра. Символьные и алгебраические вычисления. – М.: Мир, 1986.
9. Аржанцев И.В. Базисы Гребнера и системы алгебраических уравнений. – М.: МЦНМО, 2003. – 68 с.



Algorithmization and Software Implementation of the Method of Eliminating Variables in Polynomial Optimization Problems

Nefedov V.N.*

MAI, Moscow, Russia,
e-mail: nefedovvn54@yandex.ru

Zharkikh A.V.**

MAI, Moscow, Russia,
e-mail: alexvzhar@gmail.com

The method of sequential exclusion of variables in polynomial optimization problems is considered. A number of problems are solved using this method. The practical steps of an algorithm are described, which reduces the initial polynomial optimization problem to a multi-stage branching process of obtaining a finite number of alternative problems, the output of which gives a finite set of polynomials in one variable. As a result, solving a number of polynomial problems reduces to sorting out a finite number of vectors whose components are the real roots of polynomials.

Keywords: polynomials, exclusion of variables, optimization problems, systems of algebraic equations.

References

1. Nefedov V.N. Metod isklyucheniya peremennykh v polinomial'nykh zadachakh optimizatsii – Dep. v VINITI, 1984, № 7590–84.
2. Nefedov V.N. Polinomial'nyye zadachi optimizatsii. ZH. vychisl. matem. i matem. fiz. 1987. T. 27. № 5. pp. 661–675.
3. Gubar' YU.V. Vvedeniye v matematicheskoye programmirovaniye. – INTUIT (natsional'nyy otkrytyy universitet), 2016. – 227 p.
4. Verzhbitskiy V.M. Osnovy chislennykh metodov. – Moscow: Vysshaya shkola, 2002. – 840 p.
5. Kanovey G.V., Logofet D.O. D-Ustoychivost' matrits 4×4 . ZH. vychisl. matem. i matem. fiz. 1998. T. 38. № 9. p. 1429–1435.

For citation:

Nefedov V.N., Zharkikh A.V. Algorithmization and Software Implementation of the Method of Eliminating Variables in Polynomial Optimization Problems. *Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis*, 2020. Vol. 10, no. 1, pp. 110–128. DOI: 10.17759/mda.2020100107 (In Russ., abstr. In Engl.)

***Nefedov Viktor Nikolayevich**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Mathematical Cybernetics, Moscow Aviation Institute (MAI), Moscow, Russia, e-mail: nefedovvn54@yandex.ru

****Zharkikh Aleksey Vladimirovich**, Master's degree student at the Faculty of Information Technology and Applied Mathematics, Moscow Aviation Institute (MAI), Moscow, Russia, e-mail: alexvzhar@gmail.com



6. Logofet D.O. Stronger-than-Lyapunov notions of matrix stability, or how “flowers” help solve problems in mathematical ecology. *Linear Algebra Appl*, 398 (2005), pp. 75–100.
7. Nefedov V.N. Ob odnom dostatochnom uslovii ekstremuma dlya polinomov i stepennykh ryadov – Dep. v VINITI, 1990, № 2666-V90.
8. Bukhberger B. Algoritmicheskiy metod v teorii polinomial’nykh idealov. *Komp’yuternaya algebra. Simvol’nyye i algebraicheskiye vychisleniya*. – Moscow: Mir, 1986.
9. Arzhantsev I.V. Bazisy Grebnera i sistemy algebraicheskikh uravneniy. – Moscow: MTSNMO, 2003. – 68 p.

◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇ **ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ** ◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇

УДК 519.61

**Программное обеспечение решения полностью
нечетких систем линейных уравнений
с прямоугольной матрицей системы**

Пантелеев А.В. *

МАИ (национальный исследовательский университет), Москва, Россия,
e-mail: avpanteleev@inbox.ru

Савельева В.С. **

МАИ (национальный исследовательский университет), Москва, Россия,
e-mail: verassavel@mail.ru

В статье рассматривается проблема решения полностью нечеткой линейной системы уравнений с нечеткой прямоугольной матрицей и нечеткой правой частью, описываемых с помощью нечетких треугольных чисел в форме отклонений от среднего значения. Сформирован алгоритм решения на основе нахождения псевдорешений систем линейных уравнений и соответствующее программное обеспечение. Приведены примеры, иллюстрирующие применение созданного программного обеспечения.

Ключевые слова: нечеткие числа, полностью нечеткая линейная система уравнений, треугольные числа, псевдообратная матрица, псевдорешение.

Для цитаты:

Пантелеев А.В., Савельева В.С. Программное обеспечение решения полностью нечетких систем линейных уравнений с прямоугольной матрицей системы // Моделирование и анализ данных. 2020. Том 10. № 1. С. 129–139. DOI: 10.17759/mda.2020100108

****Пантелеев Андрей Владимирович***, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математической кибернетики факультета «Информационные технологии и прикладная математика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), Москва, Россия, e-mail: avpanteleev@inbox.ru

*****Савельева Вера Сергеевна***, студент бакалавриата факультета «Информационные технологии и прикладная математика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), Москва, Россия, e-mail: verassavel@mail.ru



1. ВВЕДЕНИЕ

На практике при задании элементов матриц, описывающих математическую модель в инженерных и экономических задачах, информация может быть размытой, т.е. представляться некоторым отрезком возможных значений. Более того, возможен случай, когда задается четкое значение и границы отрицательного и положительного изменений относительно четкого значения. В этом случае можно описать элементы матриц с помощью нечетких чисел и операций над ними, в частности треугольных чисел. Численному значению из интервала возможных значений ставится в соответствие степень уверенности, которая в теории нечетких множеств задается так называемыми функциями принадлежности [10; 12; 14]. Одним из возможных типов функций принадлежности являются треугольные, которые задают треугольные числа.

Наибольшее распространение в инженерных и экономических расчетах получили линейные модели, описываемые системами линейных уравнений. В случае неопределенности параметров матрицы системы и вектора ее правых частей система линейных уравнений трактуется как полностью нечеткая, решение которой ищется в классе треугольных нечетких чисел [10; 12]. Различные методы решения таких систем предложены в [3; 6; 7; 8; 9; 11; 13; 14]. Авторами сформирован алгоритм решения полностью нечеткой системы уравнений в случае прямоугольной матрицы системы, который реализован в виде программного обеспечения, эффективность которого продемонстрирована в ходе анализа решений модельных примеров. Программное обеспечение процесса решения нечетких линейных систем с нечеткой правой частью и с нечеткой квадратной матрицей системы описаны в [4; 5].

Приведем основные определения, которые будут использоваться при составлении нечеткой математической модели [10;12].

1. Треугольное нечеткое число $\tilde{A} = (m, \alpha, \beta)$ задается функцией принадлежности

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 1 - \frac{m-x}{\alpha}, & m - \alpha \leq x < m, \quad \alpha > 0, \\ 1 - \frac{x-m}{\beta}, & m \leq x \leq m + \beta, \quad \beta > 0, \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (1)$$

Число $\tilde{0} = (0, 0, 0)$ считается нулевым треугольным нечетким числом.

2. Нечеткое число \tilde{A} называется положительным ($\tilde{A} > 0$), если его функция принадлежности $\mu_{\tilde{A}}(x) = 0 \quad \forall x \leq 0$, и отрицательным ($\tilde{A} < 0$), если его функция принадлежности $\mu_{\tilde{A}}(x) = 0 \quad \forall x \geq 0$. Число $\tilde{A} = (m, \alpha, \beta)$ является положительным, если $m - \alpha \geq 0$.

3. Два нечетких треугольных числа $\tilde{M} = (m, \alpha, \beta)$ и $\tilde{N} = (n, \gamma, \delta)$ равны тогда и только тогда, когда

$$m = n, \alpha = \gamma, \beta = \delta. \quad (2)$$

4. Суммой двух нечетких треугольных чисел $\tilde{M} = (m, \alpha, \beta)$ и $\tilde{N} = (n, \gamma, \delta)$ называется число



$$(m, \alpha, \beta) \oplus (n, \gamma, \delta) = (m + n, \alpha + \gamma, \beta + \delta). \quad (3)$$

5. Произведение двух положительных нечетких чисел $\tilde{M} = (m, \alpha, \beta) > 0$ и $\tilde{N} = (n, \gamma, \delta) > 0$ при малых значениях α, β по сравнению с m и малых γ, δ по сравнению с n приближенно определяется, как нечеткое число вида

$$(m, \alpha, \beta) \otimes (n, \gamma, \delta) \cong (mn, m\gamma + n\alpha, m\delta + n\beta). \quad (4)$$

В частном случае умножения на четкое число λ :

$$\lambda \otimes (m, \alpha, \beta) = \begin{cases} (\lambda m, \lambda \alpha, \lambda \beta), \lambda > 0, \\ (\lambda m, -\lambda \beta, -\lambda \alpha), \lambda < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Когда разброс, характеризуемый α, β и γ, δ , не является малым, может быть использована более точная формула умножения:

$$(m, \alpha, \beta) \otimes (n, \gamma, \delta) \cong (mn, m\gamma + n\alpha - \alpha\gamma, m\delta + n\beta + \beta\delta). \quad (6)$$

6. Матрица $\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})$ называется нечеткой, если каждый ее элемент представляется нечетким числом.

Нечеткая матрица называется положительной ($\tilde{A} > \tilde{0}$), если каждый ее элемент (нечеткое число) положителен. Аналогично определяются неотрицательные, отрицательные, неположительные нечеткие матрицы.

Нечеткая матрица может быть представлена в форме $\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij}) = ((a_{ij}, \alpha_{ij}, \beta_{ij}))$, или $\tilde{A} = (A, M, N)$, где $A = (a_{ij}), M(\alpha_{ij}), N(\beta_{ij})$ – три матрицы с четкими элементами.

7. Система вида

$$\tilde{A} \otimes \tilde{x} = \tilde{b} \quad (7)$$

с нечеткой прямоугольной матрицей $\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})$, $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$ и нечеткой матрицей $\tilde{b} = (\tilde{b}_j)$ размеров $m \times 1$ называется полностью нечеткой линейной системой. В расширенной форме ее можно переписать

$$(\tilde{a}_{11} \otimes \tilde{x}_1) \oplus \dots \oplus (\tilde{a}_{1n} \otimes \tilde{x}_n) = \tilde{b}_1,$$

$$(\tilde{a}_{21} \otimes \tilde{x}_1) \oplus \dots \oplus (\tilde{a}_{2n} \otimes \tilde{x}_n) = \tilde{b}_2,$$

⋮

$$(\tilde{a}_{m1} \otimes \tilde{x}_1) \oplus \dots \oplus (\tilde{a}_{mn} \otimes \tilde{x}_n) = \tilde{b}_m.$$

2. МЕТОД РЕШЕНИЯ ПОЛНОСТЬЮ НЕЧЕТКИХ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

В [10] предложен метод нахождения положительного решения $\tilde{x} = (x, y, z) > \tilde{0}$ полностью нечеткой линейной системы $\tilde{A} \otimes \tilde{x} = \tilde{b}$ с $\tilde{A} = (A, M, N) > \tilde{0}$, матрица A невырожденная, $\tilde{b} = (b, g, h) > \tilde{0}$ при выполнении предположений о малых значениях α, β по сравнению с m и малых γ, δ по сравнению с n :



$$\begin{aligned}x &= A^{-1}b, \\y &= A^{-1}(g - Mx), \\z &= A^{-1}(h - Nx).\end{aligned}\tag{8}$$

или $x = A^{-1}b, y = A^{-1}(g - MA^{-1}b), z = A^{-1}(h - NA^{-1}b)$. Для получения решения $\tilde{x} = (x, y, z) > \tilde{0}$ требуется последовательно применить формулы в (8).

В [11] сформулированы условия, при которых полностью нечеткая система имеет положительное решение: матрица A невырожденная; $A^{-1}(E + MA^{-1})b \geq A^{-1}h$; $A^{-1}h \geq A^{-1}(MA^{-1})b$; $A^{-1}g \geq A^{-1}NA^{-1}b$. Эти условия заменили более жесткие, предложенные в [8].

Если матрица A прямоугольная, в [13] получены формулы для случая, если \tilde{A} – неотрицательная нечеткая матрица, \tilde{x} – неотрицательный нечеткий вектор, \tilde{b} – известный нечеткий вектор:

$$\begin{aligned}x &= A^{-1}b, \\y &= A^{-1}(g - Mx), \\z &= A^{-1}(h - Nx),\end{aligned}\tag{9}$$

где A^{-1} – псевдообратная матрица [1], а $x = A^{-1}b$ – псевдорешение системы $Ax = b$, т.е. наименьший по модулю $|x| = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2}$ столбец x среди всех столбцов, минимизирующих величину $|Ax - b|$.

Если \tilde{A} – неотрицательная нечеткая матрица, \tilde{b} – неотрицательный нечеткий вектор, псевдообратная матрица A^{-1} неотрицательная, а также выполняются условия: $h \geq NA^{-1}b$, $g \geq MA^{-1}b$, $(E + MA^{-1})b \geq g$, то система (7) имеет неотрицательное нечеткое минимальное решение, удовлетворяющее условиям $y \geq 0$, $z \geq 0$, $x - y \geq 0$ и имеющее среди всех возможных решений наименьшую величину евклидовой нормы [13].

3. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ПОЛНОСТЬЮ НЕЧЕТКОЙ ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ

1. Задать матрицы системы $\tilde{A} = (A, M, N) > \tilde{0}$ и правой части $\tilde{b} = (b, g, h) > \tilde{0}$, где \tilde{A} – неотрицательная нечеткая матрица, \tilde{b} – неотрицательный нечеткий вектор,
2. Найти псевдообратную матрицу A^{-1} , проверить, что она неотрицательная. Если A – матрица размеров $(r \times n)$, то при $r < n$ и $\text{rg } A = r$ псевдообратная матрица находится по формуле $A^{-1} = A^T(AA^T)^{-1}$, а при $r > n$ и $\text{rg } A = n$ по формуле $A^{-1} = (A^T A)^{-1} A^T$. В общем случае можно применить метод Гревилля, метод элементарных преобразований блочной матрицы, метод скелетного разложения [1].
3. Проверить выполнение условий существования неотрицательного нечеткого решения системы: $h \geq NA^{-1}b$, $g \geq MA^{-1}b$, $(E + MA^{-1})b \geq g$. Если оно не выполнено, перейти к п. 1.
4. Найти решение $\tilde{x} = (x, y, z) \geq \tilde{0}$ по формулам



$$x = A^{-1}b,$$

$$y = A^{-1}(g - Mx),$$

$$z = A^{-1}(h - Nx).$$

Замечания

1. Если матрица A – квадратная невырожденная, то в п. 3 проверять условия $A^{-1}(E + MA^{-1})b \geq A^{-1}h$; $A^{-1}h \geq A^{-1}(MA^{-1})b$; $A^{-1}g \geq A^{-1}NA^{-1}b$, а в п. 4 использовать формулы для определения нечеткого положительного решения $\tilde{x} = (x, y, z) > \tilde{0}$: $x = A^{-1}b, y = A^{-1}(g - Mx), z = A^{-1}(h - Nx)$.
2. Для нахождения решения можно применить более точную формулу (6) умножения нечетких чисел. Тогда неотрицательное нечеткое минимальное решение системы может быть найдено по формулам [3]:

$$x = A^{-1}b,$$

$$y = (A - M)^{-1}(g - Mx),$$

$$z = (A + N)^{-1}(h - Nx).$$

при выполнении условий: $(A - M)^{-1} \geq 0, (A + N)^{-1} \geq 0, h \geq NA^{-1}b, g \geq MA^{-1}b, [A^{-1} - (A - M)^{-1}MA^{-1}]b \geq (A - M)^{-1}g$.

4. МОДЕЛЬНЫЕ ПРИМЕРЫ

Пример 1. Решить полностью нечеткую систему линейных уравнений:

$$(0.4, 0.01, 0.02) \otimes \tilde{x}_1 \oplus (0.2, 0.017, 0.03) \otimes \tilde{x}_2 \oplus (0.6, 0.05, 0.02) \otimes \tilde{x}_3 = (2, 1, 2),$$

$$(0.5, 0.03, 0.03) \otimes \tilde{x}_1 \oplus (0.7, 0.02, 0.02) \otimes \tilde{x}_2 \oplus (0.2, 0.03, 0.04) \otimes \tilde{x}_3 = (3, 2, 1.5).$$

Здесь

$$A = \begin{pmatrix} 0.4 & 0.2 & 0.6 \\ 0.5 & 0.7 & 0.2 \end{pmatrix}, M = \begin{pmatrix} 0.01 & 0.017 & 0.05 \\ 0.03 & 0.02 & 0.03 \end{pmatrix}, N = \begin{pmatrix} 0.02 & 0.03 & 0.02 \\ 0.03 & 0.02 & 0.04 \end{pmatrix},$$

$$b = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}, g = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, h = \begin{pmatrix} 2 \\ 1.5 \end{pmatrix}.$$

По формулам (9) получим решение: $\tilde{x} = \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (2.0071, 1.111, 1.250) \\ (2.5222, 1.823, 0.417) \\ (1.15453, 0.117, 2.129) \end{pmatrix}$ (рис. 1).

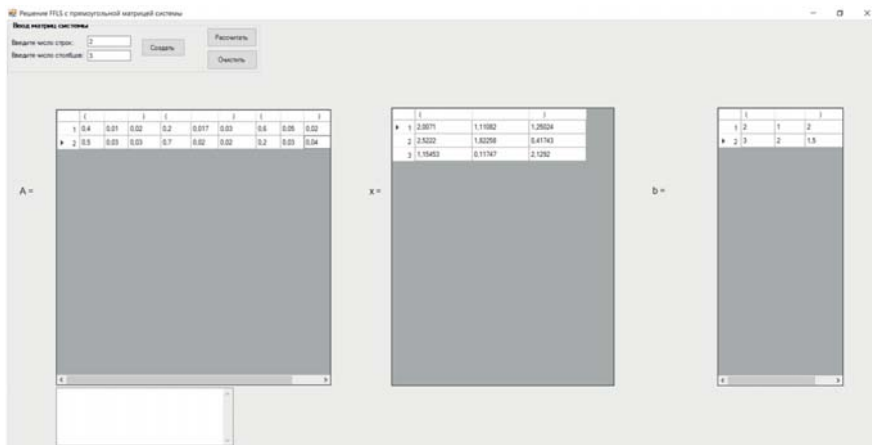


Рис. 1. Результаты решения примера 1

Пример 2. Решить полностью нечеткую систему линейных уравнений:

$$(1, 0.1, 0.5) \otimes \tilde{x}_1 = (4, 0.2, 1),$$

$$(2, 0.6, 0.3) \otimes \tilde{x}_1 = (3, 1.3, 0.6),$$

$$(3, 0.5, 2) \otimes \tilde{x}_1 = (5, 1, 4).$$

Здесь $A = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$, $M = \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.6 \\ 0.5 \end{pmatrix}$, $N = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.3 \\ 2 \end{pmatrix}$, $b = \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \\ 5 \end{pmatrix}$, $g = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 1.3 \\ 1 \end{pmatrix}$, $h = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.6 \\ 4 \end{pmatrix}$.

В [13] найдено решение по формулам (9):

$$A^{-1} = (0.0714, 0.1429, 0.2143), \quad \tilde{x} = (\tilde{x}_1) = ((1.7857, 0.0571, 0.1087)) \text{ (рис. 2).}$$

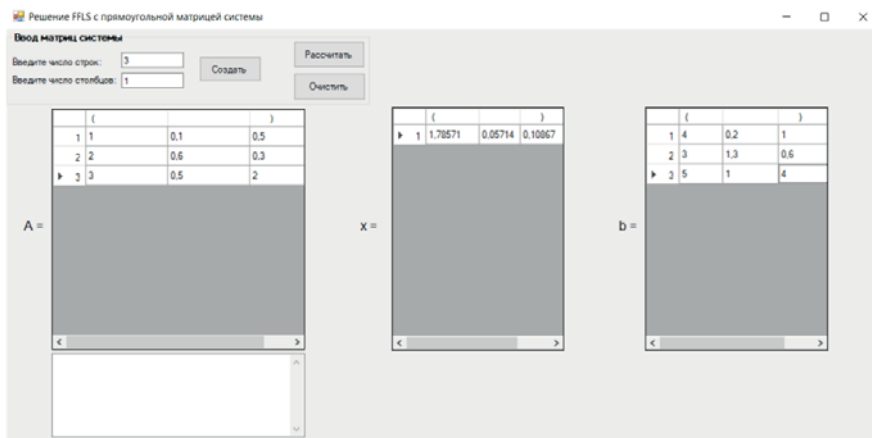


Рис. 2. Результаты решения примера 2



Пример 3. Решить полностью нечеткую систему линейных уравнений, заданную матрицами (задача о нахождении плана производства тканей [2]):

$$A = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0.2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.2 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, M = \begin{pmatrix} 0.01 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.02 & 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.02 & 0.03 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$N = \begin{pmatrix} 0.02 & 0.03 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.05 & 0 & 0.04 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.04 & 0.06 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} 72 \\ 96 \\ 120 \end{pmatrix}, g = \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \\ 7 \end{pmatrix}, h = \begin{pmatrix} 3 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix}.$$

По формулам (9) получим решение: $\tilde{x} = \begin{pmatrix} (32.64, 0.975, 0.573) \\ (40.93, 1.741, 0.707) \\ (36.517, 1.176, 0.695) \\ (54.022, 2.214, 0.806) \\ (82.168, 1.552, 1.654) \\ (100.418, 4.328, 1.821) \end{pmatrix}$ (рис. 3).

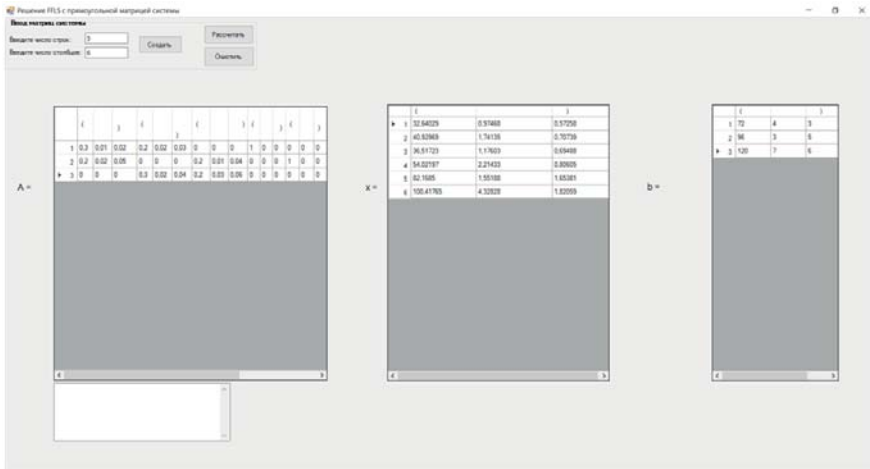


Рис. 3. Результаты решения примера 3

Пример 4. Решить полностью нечеткую систему линейных уравнений вида (7), заданную матрицами:

$$A = \begin{pmatrix} 40 & 50 & 40 \\ 30 & 20 & 10 \\ 20 & 10 & 30 \\ 40 & 20 & 80 \\ 10 & 40 & 20 \end{pmatrix}, M = \begin{pmatrix} 4 & 5 & 6 \\ 3 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 3 \\ 4 & 2 & 2 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}, N = \begin{pmatrix} 4 & 5 & 1 \\ 3 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \\ 3 & 5 & 1 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} 200 \\ 100 \\ 80 \\ 160 \\ 120 \end{pmatrix}, g = \begin{pmatrix} 30 \\ 30 \\ 25 \\ 25 \\ 35 \end{pmatrix}, h = \begin{pmatrix} 20 \\ 50 \\ 30 \\ 40 \\ 60 \end{pmatrix}.$$



По формулам (9) получим решение: $\tilde{x} = \begin{pmatrix} (1.614, 0.155, 0.279) \\ (2.225, 0.313, 0.330) \\ (0.657, 0.015, 0.158) \end{pmatrix}$ (рис. 4).

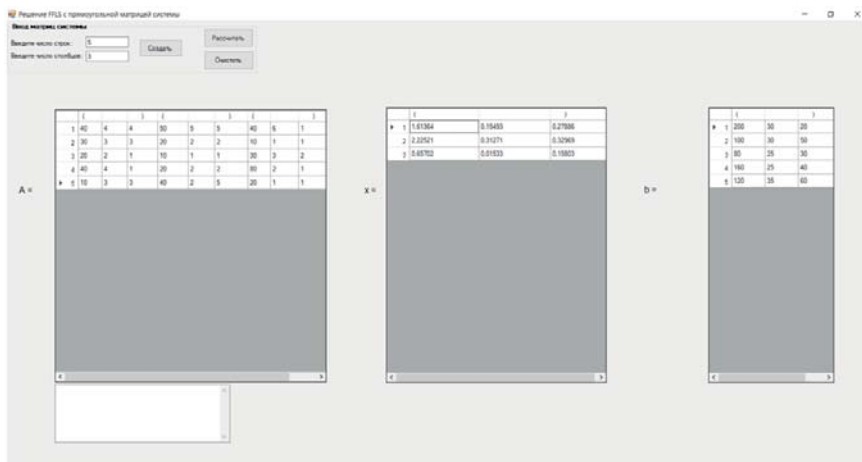


Рис. 4. Результаты решения примера 4

На рис. 1–4 отражены результаты, полученные с помощью разработанного программного обеспечения в среде VisualStudio на языке C#.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформирован алгоритм решения полностью нечеткой линейной системы с прямоугольной матрицей системы на основе понятия псевдорешения, а на его основе создано программное обеспечение. Его применение продемонстрировано на примерах решения полностью нечетких линейных систем с прямоугольными матрицами различных размеров и соотношений числа строк и столбцов, выполнено сравнение с известными результатами.

Литература

1. Бортакровский А.С., Пантелеев А.В. Линейная алгебра в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 2010.
2. Пантелеев А.В. Методы оптимизации. Практический курс / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – М.: Логос, 2011.
3. Пантелеев А.В., Лулева С.Ю. Численный метод решения полностью нечетких систем линейных уравнений // Труды МАИ. 2019. № 109. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=111433>
4. Пантелеев А.В., Савельева В.С. Алгоритмическое и программное обеспечение исследования математической модели межотраслевого баланса при нечеткой информации о конечном спросе // Моделирование и анализ данных. 2019. № 3. С. 11–23.
5. Пантелеев А.В., Савельева В.С. Анализ модели выполнения производственного задания при нечеткой информации о коэффициентах прямых затрат и конечном спросе на про-



- дукцию // Моделирование и анализ данных. 2019. Том 09. № 4. С. 32–45. doi:10.17759/mda.2019090402
6. *Abbasbandy S., Ezzati R., Jafarian A.* LU decomposition Method for Solving Fuzzy System of Linear Equations // *Appl. Math. Comput.* 2006. V. 172. P. 633–643.
 7. *Abbasbandy S., Otadi M., Mosleh M.* Minimal Solution of a System of General Dual Fuzzy Linear Systems // *Chaos Solutions and Fractals*. 2008. V. 37. P. 1113–1124.
 8. *Dehghan M., Hashemi B., Ghaee M.* Computational Methods for Solving Fully Fuzzy Linear Systems // *Alied Mathematics and Computation*. 2006. V. 179. P. 328–343.
 9. *Dehghan M., Hashemi B., Ghaee M.* Solution of the Fully Fuzzy Linear Systems Using Iterative Techniques // *Chaos Solutions and Fractals*. 2007. V. 34. P. 316–336.
 10. *Dubois D., Prade H.* Fuzzy sets and systems: theory and applications, Academic Press, New York, 1980.
 11. *Malkawi G., Ahmad N., Ibrahim H.* Solving Fully Fuzzy Linear System with the Necessary and Sufficient Condition to have a Positive Solution // *Appl. Math. Inf. Sci.* 2014. V. 8, No. 3, P. 1003–1019.
 12. *Matinfar M., Nasser S.H., Sohrabi M.* Solving Fuzzy Linear System of Equations by using Housholder Decomposition Method // *Applied Mathematical Sciences*. 2008. V.51. P. 2569–2575.
 13. *Mosleh M., Abbasbandy S., Otadi M.* A Method for Solving Fully Linear System // *Mathematics Scientific Journal*. 2011. V.7. № 2. P. 59–70.
 14. *Nasser S.H., Sohrabi M., Ardil E.* Solving Fully Fuzzy Linear Systems by Use of a Certain Decomposition of the Coefficient Matrix // *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2008. V.19. P. 784–786.



Software for Solving Fully Fuzzy Linear Systems with Rectangular Matrix

Pantelev A.V.*

MAI (National Research University), Moscow, Russia

e-mail: avpantelev@inbox.ru

Saveleva V.S.**

MAI (National Research University), Moscow, Russia

e-mail: verassavel@mail.ru

The article discusses the problem of solving a fully fuzzy linear system of equations with a fuzzy rectangular matrix and a fuzzy right-hand side described by fuzzy triangular numbers in a form of deviations from the mean. A solution algorithm based on finding pseudo-solutions of systems of linear equations and corresponding software is formed. Various examples of created software application for arbitrary fuzzy linear systems are given.

Keywords: fuzzy numbers, fully fuzzy linear system of equations, triangular numbers, pseudo-inverse matrix, pseudo-solution.

References

1. Bortakovskii A.S., Pantelev A.V. Lineynaya algebra i analiticheskaya geometriya. Practicum [Linear algebra and analytic geometry. Practicum]. – Moscow: Publ. INFRA–M, 2015.
2. Pantelev A.V. Metody optimizatsii. Prakticheskii kurs [Optimization theory. Practical course]. Moscow: Publ. Logos, 2011.
3. Pantelev A.V., Luneva S.Yu. Chislennyi metod resheniya polnost'yu nechetkikh sistem lineinykh uravnenii [Numerical method of solving fully fuzzy system of linear equations] *Trudy MAI [Works of MAI]*, 2019, no. 109. Available at URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=111433>
4. Pantelev A.V., Saveleva V.S. Algoritmicheskoe i programmnoe obespechenie issledovaniya matematicheskoi modeli mezhotraslevogo balansa pri nechetkoi informatsii o konechnom sprose [Algorithmic and software research of a mathematical model of intersectoral balance with fuzzy information about final demand] *Modelirovanie i analiz dannikh [Modelling and Data Analysis]*, 2019, no. 3, pp. 11–23.

For citation:

Pantelev A.V., Saveleva V.S. Software for Solving Fully Fuzzy Linear Systems with Rectangular Matrix. *Modelirovanie i analiz dannikh = Modelling and Data Analysis*, 2020.

Vol. 10, no. 1, pp. 129–139. DOI: 10.17759/mda.2020100108 (In Russ., abstr. In Engl.)

***Pantelev Andrei Vladimirovich**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Mathematics and Cybernetics, Institute of Information Technologies and Applied Mathematics, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, e-mail: avpantelev@inbox.ru

****Saveleva Vera Sergeevna**, Undergraduate Student of the Institute of Information Technology and Applied Mathematics, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, e-mail: verassavel@mail.ru



5. Panteleev A.V., Saveleva V.S. Analiz modeli vypolneniya proizvodstvennogo zadaniya pri nechetkoi informatsii o koeffitsientakh pryamykh zatrat i konechnom sprose na produktsiyu [Analysis of the Production Task Model With Fuzzy Information About Direct Cost Factors and the Final Product Demand] *Modelirovanie i analiz dannikh [Modelling and Data Analysis]*, 2019. Vol. 09, no. 4, pp. 32–45. doi:10.17759/mda.2019090402.
6. Abbasbandy S., Ezzati R., Jafarian A. LU decomposition Method for Solving Fuzzy System of Linear Equations. *Appl. Math. Comput.* 2006. V. 172. P. 633–643.
7. Abbasbandy S., Otadi M., Mosleh M. Minimal Solutoin of a System of General Dual Fuzzy Linear Systems. *Chaos Solutions and Fractals.* 2008. V. 37. P. 1113–1124.
8. Dehghan M., Hashemi B., Ghatte M. Computational Methods for Solving Fully Fuzzy Linear Systems. *Alied Mathematics and Computation.* 2006. V. 179. P. 328–343.
9. Dehghan M., Hashemi B., Ghatte M. Solution of the Fully Fuzzy Linear Systems Using Iterative Techniques. *Chaos Solutions and Fractals.* 2007. V. 34. P. 316–336.
10. Dubois D., Prade H. *Fuzzy sets and systems: theory and applications*, Academic Press, New York, 1980.
11. Malkawi G., Ahmad N., Ibrahim H. Solving Fully Fuzzy Linear System with the Necessary and Sufficient Condition to have a Positive Solution. *Appl. Math. Inf. Sci.* 2014. V. 8, No. 3, P. 1003–1019.
12. Matinfar M., Nasser S.H., Sohrabi M. Solving Fuzzy Linear System of Equations by using Housholder Decomposition Method. *Applied Mathematical Sciences.* 2008. V.51. P. 2569–2575.
13. Mosleh M., Abbasbandy S., Otadi M. A Method for Solving Fully Linear System // *Mathematics Scientific Journal.* 2011. V.7. № 2. P. 59–70.
14. Nasser S.H., Sohrabi M., Ardil E. Solving Fully Fuzzy Linear Systems by Use of a Certain Decomposition of the Coefficient Matrix. *World Academy of Science, Engineering and Technology.* 2008. V.19. P. 784–786.



ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

УДК 004.4

Лукин В.Н.*

МГППУ, Москва, Россия,
e-mail: lukinvn@list.ru

Рассматривается «вечно живая» проблема качества программного обеспечения, которая стоит тем более остро, что программные изделия встроены во всё что можно и нельзя. Что понимается под качеством? Каковы его критерии? Можно ли его измерить? Что мешает качеству и как его улучшить?

Ключевые слова: Качество программного обеспечения, стандарты качества, надёжность, удобство использования, защищённость, оценка качества, управление качеством, обучение качественной разработке.

1. ВВЕДЕНИЕ

*Если даже каждый будет делать все,
что в его силах, это все же не будет ответом,
адекватным сложности проблемы качества.
Э.Деминг*

Проблема качества программного обеспечения (ПО) обсуждается давно, и всё время остаётся актуальной. Действительно, на каждом шагу приходится сталкиваться с ПО, которое мы считаем некачественным. Но это наша точка зрения, разработчик же может иметь свой взгляд, согласно которому всё хорошо, а если с его продукцией трудно работать – учиться надо. Автору ПО, особенно начинающему, почему-то трудно понять, что программные продукты адресуются другим людям, которым нужно делать своё дело, а не разбираться в его креативных идеях. Вопросам качества посвящено много работ (например, [1, 2, 3, 4]), но проблема оказалась удивительно живой: все понимают, что так жить нельзя, но живут.

Для цитаты:

Лукин В.Н. Проблемы качества программного обеспечения // Моделирование и анализ данных. 2020. Том 10. № 1. С. 140–156. DOI: 10.17759/mda.2020100109

*Лукин Владимир Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Московский государственный психолого-педагогический университет, Москва, Россия, e-mail: lukinvn@list.ru



2. КАЧЕСТВО

Чтобы избавиться от некачественного ПО, надо, по крайней мере, идентифицировать «врага» и определить характерные черты «друга». Разумеется, это было сделано, в том числе, на уровне стандартов [5, 6, 7, 8]. В стандартах качество определяется по-разному, но одинаково неудовлетворительно. В стандарте ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126–93 (ISO 8402:94) [8] качеством считается объём признаков и характеристик программ, который относится к их способности удовлетворять установленным или предполагаемым потребностям. ГОСТ РВ 51987–2002 определяет качество функционирования информационных систем как совокупность свойств, обуславливающих их пригодность в соответствии с целевым назначением. В ISO/IEC 25000:2014 [6] качество определяется как способность ПО при заданных условиях удовлетворять установленным или предполагаемым потребностям. Но если целевое назначение или установленные потребности ещё можно зафиксировать документально, скажем, в спецификации к продукту, то предполагаемые потребности абсолютно неизвестны. Даже неизвестно, чьи они: потребителя или производителя. И если один скажет, что ПО качественное, согласится ли с ним другой? Итак, стандарты не дают возможности однозначно определить, качественный ли продукт.

Хорошо, если не получается определить качество формально, попробуем обратиться к совокупности свойств, которые за него отвечают.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА

Стандарт ISO 8402:94 [8] определяет шесть групп качества: функциональная пригодность, надёжность, применимость, эффективность, сопровождаемость, переносимость. Каждой из них соответствует набор характеристик (всего их 21). В модели качества продукта, предложенной в стандарте ISO/IEC 25010:2011 (ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010–2015) [7], группы качества называются характеристиками, а характеристики предыдущего стандарта – подхарактеристиками. Всего этот стандарт включает восемь характеристик, в которых 30 подхарактеристик: функциональная пригодность, надёжность, удобство использования, производительность, сопровождаемость, переносимость, совместимость, защищённость.

Мы видим, что в последнем стандарте, по сравнению с предыдущим, добавились две характеристики: совместимость и защищённость. Совместимости в [8] не было, а защищённость входила характеристикой в функциональную пригодность. Несомненно, выделение её в отдельную характеристику полностью оправдано. Во-первых, это, всё-таки, не функциональная характеристика, а во-вторых, в условиях значительно участвовавших попыток взлома программного обеспечения, защищённости как элементу качества необходимо оказывать особое внимание. Кроме того, термин «применимость» заменён гораздо более подходящим «удобство использования».

Тема качества обсуждается в среде программистов-профессионалов много лет. Первым случаем, после которого качество ПО из разряда курьёзов (типа, неоплаченный счёт на 0,0 долларов привёл к штрафным санкциям неплательщику) перешло в проблему,



был, как известно, неудачный запуск американского космического корабля на Венеру. Стало понятно, что простые опечатки в программе (точка вместо запятой) могут стоить очень дорого. Тот случай породил теоретические исследования в области доказательного программирования, а технологии «подарил» структурное программирование.

Однако окончательно решить проблему качества не удалось. Более того, появлялись всё новые и новые признаки некачественного продукта, которые невозможно было игнорировать хотя бы потому, что от них зависело принятие или непринятие продукта заказчиком. Поэтому в программистском сообществе, наряду с достаточно медленно формирующимися стандартами, появлялись и другие подходы к набору характеристик.

Так, Р. Гласс [3] приводит и обосновывает признаки качества, несколько отличные от стандартов: переносимость, надёжность, эффективность, удобство работы, тестируемость, понятность, модифицируемость. Заметим, что здесь нет функциональной пригодности, которая в стандартах стоит в первой строчке. Р. Гласс принципиально считает, что это не характеристика качества, а естественное свойство любого работающего продукта: если он функционально непригоден, значит, о нём и говорить не стоит.

А. Купер [1] предлагает за основное требование к качеству систем, ориентированных не на специально подготовленного, а на обычного человека, взять простоту и удобство взаимодействия. Это, безусловно, разумно: если использование программного изделия требует специального обучения, а его использование преподносит неожиданные сюрпризы, качественным назвать его нельзя, каким бы эффективным оно не было.

Дж. Рейнвотер [9] считает, что программное изделие качественное, если пользователь им удовлетворён. Однако Р. Гласс [3] утверждает, что качество – лишь один из компонентов удовлетворённости, остальные – это выполнение требований заказчика, своевременная поставка, приемлемая цена. Их он в качество не включает.

А. Н. Терехов [10], на основе анализа нормативных документов, предлагает считать программное обеспечение некачественным, если выполняется хотя бы одно из негативных условий, отвечающих наиболее значимым характеристикам качества: неадекватность функционирования, недостаточное взаимодействие с другими средствами, отказы в процессе применения по назначению, неэффективность по времени отклика, неполнота отражения информации и потеря её актуальности, несоответствие хранимых данных и вводимой информации, нарушение конфиденциальности, некорректность сопровождающей и справочной документации.

Интересно посмотреть на пересечение свойств качества, указанных экспертами, и характеристик стандарта [7]. В нашем случае пересечение, с точностью до названия характеристики, следующее: надёжность, переносимость, удобство использования, защищённость, производительность, сопровождаемость.

Здесь необходимы некоторые комментарии. Прежде всего, рассмотрим понятие «сопровождаемость», которое включено в пересечение, хотя в явном виде у экспертов его нет. Учитывая, что Р. Гласс много лет занимался сопровождением, в своих публикациях неоднократно обращался к этой проблеме, он, казалось бы, должен его упомянуть. Но он, будучи специалистом, глубоко знающим суть проблемы, говорит об этом косвенно, разбивая сопровождение на три компонента: тестируемость, понятность, модифицируемость.

Заметим, что в пересечении нет такого понятия, как *функциональная пригодность*. Мы знаем отношение к нему Р. Гласса. Но ведь кто-то другой должен про это сказать! И действительно, у А. Н. Терехова есть неадекватность функционирования как отрицательный признак. Но адекватность функционирования и функциональная пригодность – вещи разные. Приложение может функционировать, быть пригодным для некоторого производственного процесса, приносить пользу, но не выполнять или не полностью выполнять какие-то его функции. Например, если вы приходите в отделение Сбербанка, чтобы оплатить коммунальные расходы, взять деньги с карточки и отметить платёж, пришедший на книжку, вам придётся несколько раз вводить пин-код, хотя вы никуда не отлучаетесь, а операционист выполняет, по сути, одну транзакцию. Функциональная пригодность здесь есть, как и неадекватность функционирования, которая снижает качество продукта.

К сожалению, никто, кроме А. Н. Терехова, не упоминает проблему, возникающую из-за некачественной разработки *базы данных*. А на это следовало бы обратить особое внимание: сколько здесь бывает неприятностей! Даже нашумевшая в своё время катастрофа при запуске корабля с космодрома «Восточный» произошла во многом, если не исключительно, по причине неактуальности информации, которая служила для ориентации.

Удобство использования и удобство взаимодействия можно считать синонимами, хотя разница есть: в первом случае пользователь работает с системой как с инструментом, ему нужно, чтобы эта «лопата» была удобной. Во втором предполагается двустороннее взаимодействие: пользователь должен понимать «потребности» другой стороны. Это налагает на разработчика дополнительные требования, скажем, понятность и однозначность диалога, включая графическое оформление и навигацию, исключение сленга, умолчаний, некорректных высказываний и т.п.

Термин «*производительность*», который принят в стандарте, видимо, более подходящий, чем эффективность. Последняя может толковаться излишне расширительно: заказчик, использующий систему, может считать её неэффективной, если она, скажем, не приносит прибыли. Понятно, что к производительности это не имеет прямого отношения. Эффективность по времени отклика (А. Н. Терехов) практически то же самое, но здесь подразумевается условие жёсткого реального времени, тогда как производительность может быть в среднем, что обычно устраивает пользователя.

Защищённость, упоминаемая всеми авторами и выступающая как отдельная характеристика в стандарте [7], в отличие от [8], где она входит в функциональную пригодность, с глобализацией информационных структур, становится всё более важной характеристикой качества. Сейчас даже простенькие студенческие поделки включают элементы защиты, хотя бы парольной. А серьёзную информационную систему, особенно если она имеет доступ к жизненно важной информации, вообще нельзя рекомендовать к использованию, если она не имеет профессиональной защиты.

Переносимость – это характеристика, которая требуется, если программное обеспечение планируется использовать в различных программно-аппаратных средах. Переносимость была особенно важна, когда подобных сред было много даже в рам-



ках одной организации, и везде должны были работать одинаковые программные изделия. Сейчас острота проблемы существенно ниже.

И, наконец, *надёжность*. Это свойство упоминается во всех оценках качества с самых ранних времён. Подразумевает оно предсказуемость и уровень доверия к процессу и результатам работы программного изделия, его отказоустойчивость и восстанавливаемость. В более ранние времена сказали бы – программно-аппаратного комплекса, но в последние годы надёжность аппаратуры многократно выросла, а программного обеспечения, похоже, снизилась, так что про аппаратную составляющую говорить не будем. А. Н. Терехов вместо термина «ненадёжность» использует «отказы в процессе применения по назначению», что имеет свой резон: если какую-то вещь используешь не по назначению, скажем, микроскоп для забивания гвоздей, трудно сетовать на ненадёжность. Правда, программные изделия редко используют не по назначению, разве что ПО для видеоконференций, которое применяют для дистанционного обучения в период эпидемии.

Причина ненадёжности – программные ошибки. Трудно вообще придумать, что, кроме программных ошибок, привело бы к ненадёжности. И ошибки эти чаще всего связаны с обработкой нештатных ситуаций. Приведём только пару примеров, первый из которых связан с крупными материальными потерями, а второй, к сожалению, с человеческими жизнями.

По сообщению Европейского космического агентства 23 ноября 2016 г., произошел сбой при входе «Скиапарелли» в атмосферу Марса. Получив неверные данные, система управления неправильно вычислила высоту, которая оказалась отрицательной, то есть ниже уровня поверхности. Это привело к преждевременному раскрытию парашюта и срабатыванию тормозных двигателей, а затем к активации на высоте 3,7 километра системы посадки, которая должна была сработать уже после того, как модуль сел бы на Марс. Коллекция программных ошибок, которые видны из этого сообщения, просто поражает! Система, получив заведомо некорректные данные, не идентифицирует ситуацию как нештатную, а действует по основному алгоритму: парашют раскрывается, включается система посадки, после чего модуль падает на поверхность планеты.

Второй пример – катастрофа с самолётом Boeing 737 Max авиакомпании Ethiopian Airlines в Эфиопии 10 марта 2019 г., в которой погибло 157 человек. Через несколько минут после взлета пилот сообщил диспетчерам о проблемах в системе управления полетом: датчик угла атаки ошибочно показал, что нос судна опасно задран вверх, в результате автоматическая система предотвращения сваливания самостоятельно направила самолет вниз.

Таким образом, низкая надёжность – это типичная проблема разработки программного обеспечения, причин которой множество, но в первую очередь – безответственное руководство проектом, неверное планирование сроков выполнения, низкий уровень подготовки разработчиков. Последнее – в немалой степени следствие экспериментов с обучением информационным технологиям.

И, наконец, никто из названных специалистов не указывает *совместимость* как существенную характеристику качества. Впрочем, и в предыдущих стандартах её



тоже не было. Конечно, совместимость важна, если предполагается расширяемая модель разработки программного средства, которая предполагает включение внешних систем или же оно включается в другие системы. Кроме того, совместимость предполагает корректную работу при разделении ресурсов (сосуществование) и свободный обмен данными (интероперабельность).

В соответствии со стандартом ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010–2015 [7] общее представление о качестве описывается двумя моделями: моделью качества при использовании и моделью качества продукта. Выше рассматривалось именно качество продукта.

Модель качества при использовании определяет пять характеристик и описывает воздействие продукции на заинтересованную сторону. Характеристики такие: результативность, производительность, удовлетворённость, свобода от риска и покрытие контекста (полнота контекста, гибкость). Под удовлетворённостью понимают полноценность, доверие, удовольствие, комфорт. Рассматривается экономический риск, риск для здоровья и безопасности, экологический риск.

Обратим внимание, что с точки зрения пользователя качество одного и того же программного продукта может оцениваться совершенно по-разному. Так, одну программную систему, активно внедряемую в медицинские учреждения, врачи оценивали весьма низко. На вопрос, есть ли у неё хотя бы одно достоинство, ответ был: «Да, у принтера почерк гораздо лучше, чем у врача». Правда, один из врачей отметил ещё одно достоинство: результаты анализов видны сразу. Но он же отметил и крайне неудобное взаимодействие: на одно действие нужно пять кликов (число, понятно, условное). Но руководство, своевременно получающее отчёты, наверное, было довольно. Хочется верить, что авторы подумали о таких характеристиках качества продукта, как надёжность, функциональная пригодность, сопровождаемость (на момент оценки использовалась версия 16.2!), но качество в процессе его использования испортило всю картину.

Анализируя программные системы, которые зарекомендовали себя как качественные, приходим к выводу, что основными требованиями к качеству лучше считать характеристики стандарта ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010–2015. Детальное их описание и уточнение с использованием подхарактеристик даёт достаточно адекватное представление о качестве, как оно обычно понимается.

4. ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

Для оценки и сравнения характеристик качества желательно использовать некоторые измерительные алгоритмы на основе объективных критериев. Стандарты рекомендуют предусмотреть возможность объективного и воспроизводимого измерения каждой из характеристик качества для сопоставления с техническим заданием с учётом нормы допустимых ошибок измерения. В этом случае необходима процедура определения числовых значений параметров проекта. Количественные характеристики определяются непосредственно и могут быть представлены числовыми значениями. Но таких характеристик немного. Это производительность и, с некоторыми оговорками, надёжность. Остальные определяются косвенно. Для это-



го рекомендуется идентифицировать подмножество свойств, которое в совокупности покрывает характеристику, получить показатели качества для каждого свойства и определить значение качества для этой характеристики, используя специальные расчётные алгоритмы (функции измерения).

К количественным свойствам относят, в частности, объём текста программы, его сложность, сложность по управлению. Их вычисление определено различными методиками и может быть выполнено автоматически. Однако они составляют незначительную долю в исследованиях программных систем на качество. И польза от них сомнительная: формально удовлетворительный код может содержать некорректные функции, не соответствовать требованиям, неудовлетворительно обрабатывать исключения. Если код большой, не обязательно его качество высокое: сделать большой текст из маленького и ребёнок сможет. Если код мал, он, возможно, непригоден для сопровождения. Сложность текста программы тоже ни о чём не говорит. Она может быть следствием сложного алгоритма, реализованного очень квалифицированным программистом. Но, возможно, это результат многочисленных правок на этапе программирования или порождение новичка, у которого мысли путаются в голове. Таким образом, ценность подобных характеристик для качества ничтожна.

Надёжность ПО определяется, в основном, безошибочностью: зачастую некорректность – следствие ошибок, не выявленных во время тестирования. Она измеряется степенью покрытия ПО тестами. Мерой может служить относительное количество протестированных функций и маршрутов, но следует учитывать уровень потенциальной опасности отдельных элементов, оценка которого часто сложна и не однозначна.

Гораздо труднее оценить такую характеристику, как удобство взаимодействия. Обычно приводят примеры «хороших» и «плохих» пользовательских интерфейсов, но корректных критериев количественной оценки их качества нет.

Защищённость ПО – тоже трудно формализуемая характеристика. Методы взлома развиваются исключительно быстро, злоумышленник нередко использует такую уязвимость, как программные ошибки [11]. Оценка безопасности определяется экспертным, регистрационным или расчётным путем. В стандартах ГОСТ 28195, ГОСТ 15987 приводится метод оценки таких показателей качества, как конфиденциальность, защищённость от программно-технических воздействий и от несанкционированного доступа. В первом случае оценка – это вероятность сохранения конфиденциальности информации в течение заданного периода, во втором – вероятность отсутствия опасного воздействия в течение заданного периода, в третьем – вероятность сохранения защищённости информационных и программных ресурсов. Комплексная оценка формируются на основе частных показателей. Пример расчёта защищённости с использованием автоматического анализа программного кода приводится в работе [11].

Сопровождаемость и часть других характеристики количественно не измеримы, они оцениваются качественным способом. Примеры качественных шкал для измерения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Примеры качественных шкал для измерения сопровождаемости

Характеристика и свойства качества	Мера	Шкала
<i>Изучаемость</i> трудоемкость изучения применения; продолжительность изучения; объем эксплуатационной документации; объем электронных учебников	Чел.-часы Часы Страницы Кбайты	1–100 1–1000 10–1000 100–10000
<i>Модифицируемость</i> трудоемкость подготовки изменений; длительность подготовки изменений	Чел.-часы Часы	1–1000 1–1000
<i>Тестируемость:</i> трудоемкость тестирования изменений; длительность тестирования изменений	Чел.-часы Часы	1–1000 1–100

Мы видим, что даже если меры выражены числовыми шкалами, их неопределённость не даёт возможности адекватно оценить качество. Возникает вопрос и о корректности этих числовых шкал. Например, если объем эксплуатационной документации 1000 страниц, это лучше, чем 10? Возможно, изделие столь некачественно, что без такого документа не обойтись, а короткая инструкция говорит о простоте использования, то есть о высоком качестве. Но короткая инструкция может быть неполной или выполненной небрежно, а объёмистый документ соответствует сложному и серьёзному продукту.

Несколько слов об измерении производительности. В «древние» времена, когда остро стоял вопрос реализации сложных вычислительных алгоритмов, производительность рассматривалась как одна из важнейших характеристик качества: неэффективная по времени программа из-за слабости вычислительной техники могла считаться сутками. С появлением мощных процессоров и ёмкой памяти острота проблемы исчезла и о ней стали забывать. Но с использованием глобальных сетей и необходимостью обработки больших данных проблема производительности снова выходит на первый план. Конечно, в современных условиях доступны значительные вычислительные мощности, однако их загруженность постоянно растёт. Кроме того, всё более значительную долю программного обеспечения составляют системы реального времени, которые весьма чувствительны к эффективности по времени, и их качество принципиально зависит от этой характеристики. Измерение производительности программной системы, которая работает во взаимодействии с другим программным обеспечением, в нагруженных средах, крайне сложная задача. Как правило, оценочные значения можно получить только в результате квалифицированно выполненного нагрузочного тестирования.

5. ПРЕПЯТСТВИЯ

Что можно считать основным препятствием к достижению качества? Однозначно на этот вопрос ответить невозможно: как различные характеристики в разных случаях могут иметь различный приоритет, так и причины нарушения качества в разных



ситуациях различны. Нельзя, например, не согласиться с Д. Платтом [2], что во многих случаях это результат испуганного согласия людей пользоваться навязываемым ему негодным ПО. А. Купер справедливо считает, что производство качественного ПО не требует намного больше ресурсов, мешают традиции производства. Посмотрим на жизненный цикл производства со стороны риска не достижения требуемого качества.

Прежде всего, это ошибки управления проектом, в частности – неверная оценка времени разработки. Почему-то «менеджеры» уверены в правильности своей оценки, а программистов считают способными вписаться в любые заданные временные рамки. В результате образуется технический долг (попросту недоделки), для ликвидации которого потребуются значительные средства, не говоря уж о том, что ПО всё это время будет источником значительных, порой катастрофических, неприятностей. Достаточно вспомнить «Фобос-грунт», проект запуска космического корабля на спутник Марса Фобос, который с треском провалился и породил большие материальные и репутационные потери для нашей страны. Причиной была неверная оценка времени разработки программного обеспечения, срок сдачи которого по естественным причинам перенести было невозможно, разве что на два года. На эту причину указывал Р. Гласс [12]: «Чаще всего основной причиной неуправляемости проекта является плохая оценка сроков».

Проблема корректной оценки трудоёмкости разработки связана, прежде всего, с природой программного обеспечения. В отличие от материального производства, каждый программный проект уникален, и даже если есть аналоги, особенности нового продукта могут существенно повлиять на оценку. Модели и методы оценки, которые используются в области информационных технологий, различаются, и порой весьма значительно [13]. Все они, конечно, не лишены недостатков: будущее точно предсказать нельзя. Но это не значит, что достаточно указания – и «программисты» всё сделают в срок: «Я же им плачу!». Кроме того, начальные оценки почти никогда не уточняются и не пересматриваются. И тут может быть полезным подход, основанный на динамической оценке [13, 14], хотя для него и требуются дополнительные ресурсы.

Считается, что ошибки обходятся тем дороже, чем раньше они сделаны и позже обнаружены. Тяжёлый случай – некачественно проведённый анализ требований, при котором теряются или неверно интерпретируются требования предметной области. К значительному снижению качества приводит неудачное проектирование данных: база данных – основа информационной системы, и неправильно спроектированная, она вынудит программиста разбираться с аномалиями, лишней раз заботиться о целостности и непротиворечивости данных, решать проблему производительности, которую можно было избежать.

На этапе кодирования самые большие неприятности исходят от слабой квалификации программиста. Недостаток квалификации может быть по разным причинам. Если это новичок, есть шанс, что он обучится. Нормальный программист ранее мог работать с другим классом задач, а с текущим не сталкивался. Хуже, когда в роли программиста откровенный дилетант или тупица, который ничему не может или не хочет обучаться. Существенный риск представляет сложность программы, которая может быть следствием сложности задачи. Даже если программа и не слишком



сложная, она может выполняться в многозадачной среде с взаимодействующими процессами, особенно в системе жёсткого реального времени, что требует особого внимания. Программа может быть сложной и при простой задаче, если её реализация беспорядочная, она не обдумывается, а пишется по факту. Такое чаще случается с начинающими программистами, но и опытный программист может попасть в ловушку кажущейся простоты, если поджимает время. Третья причина – наплевательское отношение к стилю написания программы.

Помимо сложности, есть опасный риск, связанный с некачественной отладкой и недостаточным тестированием программы. Разумеется, опытный тестировщик для достижения требуемого качества постарается обеспечить достаточно полное покрытие тестами. Программист, получив результаты тестирования, исправляет свою программу... Но на это требуется время, которого далеко не всегда хватает в конце проекта, обычно из-за ошибочной оценки сроков выполнения работ. В результате жертвуют полнотой тестирования и, соответственно, качеством. Заметим, что в этом случае хуже всего проверяется корректность обработки нештатных ситуаций, что в конечном итоге оборачивается большими потерями.

Как уже отмечалось, модель качества при использовании [7] описывает воздействие программного продукта на пользователя, который оценивает его через такую характеристику, как удовлетворённость. И если с продуктом неудобно работать, пользователь считает его некачественным. Автор был свидетелем ситуации, когда пользователи в знак протеста против неудобного взаимодействия повернули экраны к стенке и отказались работать с, вообще говоря, полезным продуктом. От него пришлось отказаться. Таким образом, неудовлетворительный интерфейс становится проблемой.

Создание качественного интерфейса – сложное профессиональное занятие, которое далеко не всегда может выполнять программист, разрабатывающий программный код. По мнению А. Купера [1], программисту вообще нельзя доверять эту работу: его точка зрения на программу обычно значительно отличается от точки зрения пользователя, и то, что представляется удобным ему, далеко не всегда удобно для пользователя. Он справедливо замечает, что нельзя считать качественным продуктом тот, где нужно «продираться через 11 экранов и в конечном итоге выяснить, что все равно придется звонить в компанию». Ещё более жёсткий взгляд у Д. Платта [2], который замечает, что мы с отвращением смотрим на интерфейс нужной нам программы, не понимая, как с нею управляться, и привыкаем выполнять множество ненужных движений для достижения простых результатов.

В области построения интерфейса разработаны стандарты, как корпоративные, так и международные. В них рассматривается представление интерфейса, его согласованность, состав компонентов, принципы проектирования. Приводятся рекомендации по цветовым решениям, определяются унифицированные действия диалога. Если все разработчики следуют стандарту, пользователь может при переходе на другую систему быть уверенным в правильности обычных действий.

Однако, даже соблюдая стандарт, легко сделать интерфейс некачественным. В большой степени качество взаимодействия с прикладной системой определяется



его стилем, который непосредственно оценивает пользователь [15]. Если выдерживается согласованный стиль, пользователь быстрее привыкает к системе, что снижает риск ошибок взаимодействия и, соответственно, уровень возможных потерь. Работа выполняется эффективнее за счёт того, что всеми необходимыми в данный момент функциями можно легко воспользоваться. К сожалению, программисты интерфейс чаще выстраивают под себя, а не ориентируются на пользователя. Если к тому же стараются сократить стоимость изделия, его качество становится ужасающим. И особый случай – интерфейс для слабовидящих. Если с программным изделием предполагается работа таких пользователей, необходимо оказывать особое внимание качеству и использовать специальные подходы [16].

Существует ещё одно препятствие, о котором редко упоминают. Это переход в процессе выполнения проекта на новые элементы среды разработки, такие, как язык программирования, СУБД, операционная среда или новая версия инструментов. Такое чаще бывает при большого или сложного программного изделия, где качество критично. Конечно, чаще переход происходит в отчаянной ситуации, и руководство видит единственный путь спасения гибнущего проекта в такой соломинке, как некое новшество. Но не зря говорят, что коней на переправе не меняют: богатая практика подобных действий говорит об их порочности. Помимо того, что при этом заметно снижается производительность разработчиков, качество становится неудовлетворительным хотя бы потому, что у разработчиков нет опыта и недостаточно времени для обучения.

6. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

Термином «управление качеством» называют действия, направленные на улучшение качества продукции. Стандарт ИСО 9000:2005 определяет его как «часть менеджмента качества, направленная на выполнение требований к качеству». Объект управления качеством – процесс создания продукции, субъект – руководители, которые воздействуют на процесс создания продукции. Вместе они образуют систему управления качеством. Группа оценки качества проверяет его параметры в процессе выполнения проекта и перед выпуском продукта. В зависимости от тяжести дефектов продукт либо возвращается на доработку, либо блокируется ошибочная функция, либо вносятся косметические правки.

Продукт проверяется на соответствие формальным требованиям и содержанию. Но что такое «формальные требования»? Соответствие стандартам? Техническому заданию? И даже если продукт полностью всему этому соответствует, ещё нет гарантии, что он качественный. Тем более, что и внятно сформулировать эти требования крайне сложно, и проверить практически невозможно. Достаточно вспомнить рядовой сценарий из области тестирования ПО, когда тестировщик указывает на ошибку, а программист говорит, что это «не баг, а фича». Содержательная проверка требует ещё большего труда, времени и квалификации контролёров. К сожалению, порой какой-то из этих составляющих не хватает, и вторая часть проводится сокращённо, особенно, если в компании поощряются формально-бюрократические процедуры.



Регулярный контроль выполнения проекта и оценки его качества даёт возможность своевременно принять меры, пока ситуация не перешла в необратимую фазу. Разумная форма контроля – обсуждение и экспертная оценка проекта на любой стадии его готовности. Различают концептуальные, технические и административные обсуждения. С точки зрения управления качеством наиболее продуктивны технические обсуждения (сессии). Если они проводятся на протяжении всего периода разработки, и на них затрагиваются вопросы качества, а не только «прошли ли мы очередную веху», есть шанс получить удачный продукт. Обнаруженные недостатки исправляются, результат докладывается на следующей сессии. Важно, что на технических обсуждениях производится не защита сделанного, а выявление затруднений. Следует учесть, что это рабочие по своей сути встречи, здесь нужна открытая атмосфера, а не отчёт перед начальством.

Ну а самое худшее, что сейчас, к сожалению, становится главным – это стремление «менеджеров» к максимально быстрому выбросу ПО на рынок. Если раньше негодные продукты делали с оглядкой, то сейчас существуют даже методологии типа Scrum, которые рекомендуют выпускать очередную версию как можно быстрее, вне зависимости от степени её готовности. Возник совершенно разрушительный термин «минимально пригодный продукт», которым маскируют откровенный полуфабрикат, да и то заведомо негодного качества. И, несмотря на это, производитель заявляет, что он заботится о пользователе: обновления-то идут! Тенденция весьма тревожная.

7. ОБУЧЕНИЕ КАЧЕСТВУ

Естественно полагать, что качественное программное обеспечение производит качественно обученный специалист, нужный на профильном производстве [17]. Тогда в вузе нужно учить не просто программировать, а создавать качественный продукт. К сожалению, в процессе обучения понятие качества если и даётся, то вскользь, да и то на старших курсах, когда уже поздно что-то менять в подготовке студента как программиста [4].

Конечно, методы контроля качества, которые используются на производстве, в вузе далеко не всегда применимы. Однако если знакомить студентов как можно раньше хотя бы с очевидными требованиями к качеству и добиваться их выполнения, ситуацию можно улучшить. Это касается и написания программы, и конструирования интерфейса, и проектирования базы данных.

Положительно на привычку к качественному программированию влияет участие студентов старших курсов в реальных проектах, пользу которого отмечал ещё академик А. П. Ершов («Откуда берутся люди, способные создавать надежное программное обеспечение», «Программирование», 1976 г.). Правда, широкой поддержки по разным причинам это предложение не получило, хотя студентов к реальному программированию подключали в рамках хоздоговорных или дипломных работ. Профессор А. Н. Терехов [10] также считает, что это наиболее эффективный способ получить качественных программистов.

Следующий вариант – привлечение студентов в реальные проекты, разрабатываемые на кафедре. Будем считать, что основная цель этого – подготовить качествен-



ного программиста. В этом случае студент должен знать потребности конкретного заказчика и критерии качества, которое необходимо обеспечить. Конечно, он должен дорожить возможностью работы в проекте. Чтобы освободить время на сессию, проект должен быть либо небольшой, на один семестр, либо делиться на автономные модули. Сложность проекта должна, с одной стороны, соответствовать подготовке студента, с другой – стимулировать получение новых знаний. Студенты весьма избирательны, что хорошо, но попытки писать витиеватый код необходимо пресекать.

Ещё один вариант – работа студентов в реальных проектах организаций, не имеющих прямого отношения к учебному процессу. Результат зависит от организации, где работает студент, от характера проекта и роли в нём студента. Организация с высоким уровнем зрелости – хорошая школа, но её требования к студенту бывают завышенными.

Небольшая динамичная организация, которая производит интересные продукты – вариант весьма привлекательный, но студент нередко забрасывает учёбу, что обычно приводит к печальным последствиям. Худший вариант – рутинная работа, не прибавляющая знаний и стимулирующая низкое качество.

Очень неплохая альтернатива практике – разработка небольших, но нужных прикладных программ в рамках курсовых или дипломных работ, о чём, собственно, и упоминал А. П. Ершов. При этом, разумеется, должны явно формулироваться требования к качеству. Этот вариант может успешно совмещаться с другими.

Программирование – технологический этап, которому, в отличие от прочих, можно действительно научить студента [18]. Нужно, чтобы он чувствовал, что такое качественная программа, знал, что настоящий специалист задумывается о долгой жизни своего изделия, которую даёт, в частности, такое свойство, как «прозрачность» кода. Следует отказаться от демонстрации различных программных трюков, характерных для изучаемого алгоритмического языка: их использование в реальных программах характерно, скорее, для амбициозного новичка, чем для профессионала. Следует обращать внимание на стиль написания программ. Он, конечно, не синоним качества, но вероятность лучшего качества при хорошем стиле выше.

Есть одно интересное предложение, о котором упоминает Р. Гласс [3] и которое достаточно детально рассматривает В. Ш. Кауфман [19]. Это использование опыта классных программистов, которые по разным причинам ушли из активного программирования. Работа в области информационных технологий – удел молодых, а тот, кто получил хороший опыт и приобрёл мастерство, неожиданно оказывается не у дел. Молодёжь проходит тем же путём, делает те же ошибки, и отрасль практически не развивается качественно. Роль «стариков» при этом – делиться опытом, который позволит улучшить картину.

8. ЭПИЛОГ

Мы все обречены жить в «цифровом» мире, пользоваться неосязаемыми предметами, которые, тем не менее, существенно влияют на качество жизни. Мы, как и десять, и пятнадцать лет назад справедливо возмущаемся корявыми изделиями наших



горе-«айтишников». История с эпидемией, из-за которой приходится работать удалённо, показала, что заявленные амбиции, прямо скажем, и близко не соответствуют реальной потребности в качестве программного обеспечения, например, для технологии массового дистанционного проведения учебных занятий. Тем не менее – вдумаясь. Материальные орудия труда совершенствовались тысячелетиями, пока не стали эргономичными, пока их создатели не поняли особенности человеческого восприятия инструмента. История реального взаимодействия массового пользователя и нематериального инструмента насчитывает от силы 40 лет. За это время кардинально изменились возможности представления информации, каждый следующий прорыв «отрицает» предыдущие находки, и юное поколение мастеров не успевает вникнуть в фундаментальные идеи предыдущего поколения, увлекаясь возможностями в ущерб потребностям. Стремление быстро написать программу и показать миру своё мастерство провоцирует некачественную работу, которая, тем не менее, нравится автору. А когда он начинает понимать свои ошибки, он вдруг становится «стариком», и следующая поросль идёт мимо по тем же граблям.

Но надежда, что потребности однажды будут услышаны теми, кто имеет возможность, живёт, и залог этого – труд преподавателей, мастеров и дееспособных ветеранов.

Литература

1. Купер А. Психбольница в руках пациентов. – СПб: Символ–Плюс, 2004.
2. Платт Д. Софт – отстой! И что с этим делать? – СПб: Символ–Плюс, 2007.
3. Гласс Р. Программирование и конфликты 2.0. – СПб: Символ–Плюс, 2010.
4. Лукин В.В., Лукин В.Н., Лукин Т.В. Технология разработки программного обеспечения: учеб. пособие. – 4-е изд. – М.: Вузовская книга, 2019. – 294 с.: ил.
5. Стандарты: <http://www.gost.ru/>, обновления и новые: <http://protect.gost.ru/>.
6. Стандарты: ISO/IEC 25000:2014(en) Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Guide to SQuaRE
7. Стандарты: ISO/IEC 25010:2011 Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and software quality models ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010–2015 Информационные технологии. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программных продуктов.
8. Стандарты: ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126–93. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению.
9. Рейнвотер Дж. Как пасти котов. Наставление для программистов, руководящих другими программистами. – СПб.: Питер, 2008.
10. Терехов А.Н. Технология программирования: Учебное пособие. – М.: Интернет–Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.
11. Быстрицкий Н.Д. Методика и инструментальное средство оценки корректности функционирования информационных ресурсов: Дисс. ... канд. технических наук, 2018.
12. Гласс Р. Факты и заблуждения профессионального программирования. – СПб: Символ–Плюс, 2008.
13. Лукин В.Н., Бахиркин М.В. Динамическая оценка времени разработки программных систем. Монография. – М.: Изд-во МАИ, 2019. – 160 с.: ил.
14. Бахиркин М.В., Зинченко А.С., Кирпичников А.П., Лукин В.Н., Ткаченко Д.П. Модель динамической оценки стоимостных, временных и функциональных показателей процесса про-



- ектирования и разработки программ и программных систем. Вестник Казанского технологического университета. 2014, т.17, № 7, с. 284–290.
15. *Зотова А.А., Лукин В.Н.* Пользовательский интерфейс: история и современность. «Новые информационные технологии». Тезисы докладов XV Международной студенческой школы-семинара – М.: МИЭМ, 2007. – с. 50–55.
 16. *Дидзигури Д.Г., Лукин В.Н.* Проблемы построения пользовательского интерфейса для слабовидящих. Моделирование и анализ данных: Труды факультета информационных технологий МГППУ; вып. 3 – М.: МГППУ, 2007. – с. 51–59.
 17. *Лукин В.Н.* Подготовка качественных программистов: проблемы обучения. Моделирование и анализ данных: научный журнал. 2017, № 1. – М., 2017, с.29–41.
 18. *Лукин В.Н.* Качественные программы как предмет обучения. Моделирование и анализ данных: Труды факультета информационных технологий МГППУ; вып. 4 – М.: МГППУ, 2009. – С. 54–65.
 19. *Кауфман В.Ш.* Ниша занятости дееспособных ветеранов: https://kaufmanict.eu/ideas/Privychnologija_vs_nedomyslije.htm



Software Quality Problems

Lukin V.N.*

MSUPE, Moscow, Russia,
e-mail: lukinvn@list.ru

We consider the “ever-living” problem of software quality, which is even more acute because software products are built into everything that can or cannot be. What is meant by quality? What is its criteria? Is it possible to measure it? What hinders quality and how to improve it?

Keywords: Software quality, quality standards, reliability, usability, security, quality assessment, quality management, training in quality development.

References

1. Kuper A. *Psikhbol'nitsa v rukakh patsientov.* – SPb: SimvoL–Plyus, 2004.
2. Platt D. *Soft – otstoi! I chto s ehtim delat'?* – SPb: SimvoL–Plyus, 2007.
3. Glass R. *Programmirovanie i konflikty 2.0.* – SPb: SimvoL–Plyus, 2010.
4. Lukin V.V., Lukin V.N., Lukin T.V. *Tekhnologiya razrabotki programmogo obes-pecheniya: ucheb. posobie.* – 4-e izd. – M.: Vuzovskaya kniga, 2019. – 294 p.: il.
5. Standarty: <http://www.gost.ru/>, obnovleniya i novye: <http://protect.gost.ru/>.
6. Standarty: ISO/IEC 25000:2014(en) Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Guide to SQuaRE
7. Standarty: ISO/IEC 25010:2011 Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and software quality models GOST R ISO/MEHK 25010–2015 Informatsionnye tekhnologii. Sistem-naya i programmaya inzheneriya. Trebovaniya i otsenka kachestva sistem i programmogo obespecheniya (SQuaRE). Modeli kachestva sistem i programnykh produktov.
8. Standarty: GOST R ISO/MEHK 9126–93. Otsenka programmnoi produktsii. Kharakteristiki kachestva i rukovodstva po ikh primeneniyu.
9. Reinvoter Dzh. *Kak pasti kotov. Nastavlenie dlya programmistov, rukovodyashchikh drugimi programmistami.* – SPb.: Piter, 2008.
10. Terekhov A.N. *Tekhnologiya programmirovaniya: Uchebnoe posobie.* – M.: InterniT–Universitet Informatsionnykh Tekhnologii; BINOM. Laboratoriya znaniy, 2006.
11. Bystritskii N.D. *Metodika i instrumental'noe sredstvo otsenki korrektnosti funktsionirovaniya informatsionnykh resursov: Diss. ... kand. tekhnicheskikh nauk,* 2018.
12. Glass R. *Fakty i zabluzhdeniya professional'nogo programmirovaniya.* – SPb: SimvoL–Plyus, 2008.
13. Lukin V.N., Bakhirkin M.V. *Dinamicheskaya otsenka vremeni razrabotki programmnykh sistem. Monografiya.* – M.: Izd-vo MAI, 2019. – 160 p.: il.

For citation:

Lukin V.N. Software Quality Problems. *Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis*, 2020. Vol. 10, no. 1, pp. 140–156. DOI: 10.17759/mda.2020100109 (In Russ., abstr. In Engl.)

***Lukin Vladimir Nikolaevich**, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russia, e-mail: lukinvn@list.ru



14. Bakhirkin M.V., Zinchenko A.S., Kirpichnikov A.P., Lukin V.N., Tkachenko D.P. Model' dinamicheskoi otsenki stoimostnykh, vremennykh i funktsional'nykh poka-zatelei protsessa proektirovaniya i razrabotki programm i programmnykh sistem. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014, t.17, № 7, pp. 284–290.
15. Zotova A.A., Lukin V.N. Pol'zovatel'skii interfeis: istoriya i sovremennost'. «Novye informatsionnye tekhnologii». Tezisy dokladov XV Mezhdunarodnoi studentcheskoi shkoly-seminara – M.: MIEHM, 2007. – pp. 50–55.
16. Didziguri D.G., Lukin V.N. Problemy postroeniya pol'zovatel'skogo interfeisa dlya slabovidyashchikh. Modelirovanie i analiz dannykh: Trudy fakul'teta informatsionnykh tekhnologii MGPPU; vyp. 3 – M.: MGPPU, 2007. – pp. 51–59.
17. Lukin V.N. Podgotovka kachestvennykh programmistov: problemy obucheniya. Modelirovanie i analiz dannykh: nauchnyi zhurnal. 2017, № 1. – M., 2017, pp. 29–41.
18. Lukin V.N. Kachestvennye programmy kak predmet obucheniya. Modelirovanie i analiz dannykh: Trudy fakul'teta informatsionnykh tekhnologii MGPPU; vyp. 4 – M.: MGPPU, 2009. – pp. 54–65.
19. Kaufman V.Sh. Nisha zanyatosti deesposobnykh veteranov: https://kaufmanict.eu/ideas/Privychnologija_vs_nedomyslije.htm

Применение онтологического подхода к процессу разработки и внедрения систем Electronic Flight Bag

Мельничук А.В. *

Московский авиационный институт, Москва, Россия,
e-mail: alexander.melnichyuk@gmail.com

Судаков В.А. **

Московский авиационный институт, Москва, Россия,
ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, Москва, Россия,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1658-1941>,
e-mail: sudakov@ws-dss.com

В работе рассмотрено применение онтологического подхода к процессу разработки и внедрения информационных систем Electronic Flight Bag (EFB), предназначенных для использования пилотами воздушных судов. Разработана онтология предметной области систем EFB с описанием концептуальной модели программного приложения EFB для расчета взлетно-посадочных характеристик воздушных судов. Выполнена формализация онтологии с применением программного обеспечения Protégé.

Ключевые слова: онтология, взлетно-посадочные характеристики, Protégé, Electronic Flight Bag, EFB.

Для цитаты:

Мельничук А.В., Судаков В.А. Применение онтологического подхода к процессу разработки и внедрения систем Electronic Flight Bag // Моделирование и анализ данных. 2020. Том 10. № 1. С. 157–165. DOI: 10.17759/mda.2020100110

***Мельничук Александр Владимирович**, аспирант, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия, e-mail: alexander.melnichyuk@gmail.com

****Судаков Владимир Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук (ИПМ им. М.В.Келдыша РАН), Москва, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1658-1941>, e-mail: sudakov@ws-dss.com



1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка специализированных информационных систем для авиационной отрасли является технически сложной, наукоемкой задачей, требующей привлечения высококвалифицированных разработчиков и значительных финансовых ресурсов.

К числу таких систем относится система Electronic Flight Bag (далее – EFB), получившей мощный толчок развития с широким распространением планшетных компьютеров с 2010 года, представляющая собой высокотехнологичный аппаратно-программный комплекс, и предназначенная, прежде всего, для повышения ситуационной осведомленности и поддержки принятия решений членов летных экипажей, как в процессе подготовки к запланированному полету, так и непосредственно при его выполнении.

Вышеуказанная система состоит из множества компонентов, включающих в себя аппаратную платформу, операционную систему и программные приложения, ориентированные на решение определенных задач, т.е. реализующие определенные специализированные функции системы EFB, а также ряда других составляющих, определяющих в итоге конкретную концепцию конкретной системы EFB в конкретной авиакомпании. При этом, разработкой и поставкой разных компонентов одной и той же системы EFB – как аппаратных, так и программных, могут заниматься разные организации.

Несмотря на то, что практически все отечественные авиакомпании внедрили те или иные реализации системы EFB в своей производственной деятельности, компоненты указанных систем в подавляющем большинстве случаев разработаны иностранными компаниями и обладают множеством недостатков, в числе которых: определенные финансовые риски в условиях нестабильного курса национальной валюты (поскольку цены на иностранное оборудование и ПО привязаны к доллару и евро), неполное соответствие функционала ПО особенностям российской нормативно-правовой базы, отсутствие поддержки российских воздушных судов [1, 6].

Разработка отечественных компонентов системы EFB усложняется тем, что в настоящее время отсутствует в достаточной мере систематизированное и проработанное описание предметной области EFB, отсутствует единая терминологическая база. В настоящей работе для решения указанной проблемы предлагается создание онтологии, способной послужить фундаментом унифицированного подхода к разработке отечественных систем EFB, позволяя быстрее и с меньшими затратами ресурсов осуществлять их разработку и внедрение.

Таким образом, в условиях ограниченного финансирования и кризисных явлений в национальной и мировой экономике, особую актуальность приобретает проблема научно-технического сопровождения разработки отечественных систем EFB.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Онтология – это формальное явное описание терминов предметной области и отношений между ними [2], смысловая модель предметной области [3].



Формально модель онтологии может быть представлена в виде следующего кортежа:

$$S_{EFB} = \langle X, A, R \rangle,$$

где $X = \{x_i | i = 1, \dots, N\}$ – конечное множество терминов предметной области, представляющих собой понятия, объекты, классы, образующие онтологию S_{EFB} (N – количество понятий онтологии S_{EFB});

$A = \{a_j | j = 1, \dots, M\}$ – конечное множество атрибутов понятий (M – количество атрибутов, описывающих понятия из X);

$R = \{r_k | k = 1, \dots, L\}$ – конечное множество отношений между понятиями (L – количество отношений между понятиями x_i онтологии S_{EFB}).

Онтология должна обеспечить стандартизацию терминологии и унифицированную информационную основу для всех участников, вовлеченных в процессы разработки и внедрения систем EFB.

В рамках работы поставлена задача разработки общей онтологии предметной области систем EFB с описанием концептуальной модели программного приложения EFB для расчета взлетно-посадочных характеристик воздушных судов.

3. ОПИСАНИЕ ОНТОЛОГИИ

В качестве базовых классов онтологии предметной области EFB введем следующие понятия:

- класс EFB, определяющий аппаратную реализацию EFB;
- программное обеспечение EFB, определяющее функции, реализуемые системой EFB;
- источники исходных данных – источники данных и информации, используемой для реализации функций EFB.

Согласно документу ICAO Doc 10020 [4], оборудование EFB делится на два класса: портативное и установленное (т.е. являющееся частью конфигурации ВС). При этом, аппаратным обеспечением EFB портативного класса является электронное устройство, представляющее собой планшетный компьютер.

Информация и исходные данные, используемые в EFB, должны поступать только из официальных источников. Для понятия «Источники исходных данных» введены классы, определяющие организации, работников и бортовые системы, являющиеся официальными поставщиками и источниками информации и данных, используемых летными экипажами в EFB при подготовке к полету и при его выполнении:

- «уполномоченный лицензированный аэродромный метеорологический орган»;
- «международный банк метеоданных»;
- «Филиал ЦАИ ФГУП Госкорпорация по ОрВД», включающий подкласс «База аэронавигационных данных АРНАД»;
- «лицензированный полетный диспетчер», включающий дочерний объект «рабочий план полета»;
- «наземная служба аэродрома», включающий дочерний объект «сводно-загрузочная ведомость»;
- «бортовой компьютер ВС»;



- «производитель ВС», включающий дочерний объект «Руководство по летной эксплуатации воздушного судна»;
- «авиакомпания», включающий дочерние объекты «утвержденный Росавиацией MEL» и «политики авиакомпании».

В качестве классов понятия «Программное обеспечение EFB» выступают следующие функции EFB, реализуемые конкретным программным приложением:

- электронная судовая документация;
- электронный рабочий план полета (OFP);
- электронные аэронавигационные карты и схемы;
- расчет взлетно-посадочных характеристик воздушного судна;
- расчет центровки воздушного судна.

Для описания концептуальной модели программного приложения EFB, реализующего функции расчета взлетно-посадочных характеристик воздушных судов, были введены следующие сущности:

- база данных;
- взлетные характеристики;
- посадочные характеристики;
- фактические эксплуатационные условия;
- экспертная система.

Введем следующие классы и атрибуты сущности «база данных»:

1. Атрибуты класса «MEL»:
 - a. Номер пункта MEL.
 - b. Описание пункта MEL.
2. Класс «аэронавигационная информация» включает в себя:
 - a. атрибуты «ИКАО-код аэродрома», «ИАТА-код аэродрома», «наименование аэродрома», «превышение аэродрома», а также
 - b. подкласс «Идентификатор ВПП», включающий в себя, в свою очередь, атрибуты конкретной ВПП – заявленные дистанции, курс и уклон.
3. Атрибуты класса «воздушное судно»:
 - a. Бортовой номер ВС.
 - b. Тип ВС.
 - c. Положения закрылков.
 - d. Режимы работы двигателя.
 - e. Режимы торможения.

Введем атрибуты для описания сущности «взлетные характеристики»:

- скорость принятия решения;
- скорость подъема передней опоры шасси;
- безопасная скорость взлета;
- максимально допустимая взлетная масса.

Введем атрибуты для описания сущности «посадочные характеристики»:

- скорость захода на посадку;
- максимально допустимая посадочная масса.

Для описания сущности «фактические эксплуатационные условия» введен атрибут «фактическая масса ВС» и класс «авиационные метеорологические данные», включающий в себя следующие атрибуты:

- давление на аэродроме;
- направление ветра;
- скорость ветра;
- температура воздуха на аэродроме;
- коэффициент сцепления ВПП.
- состояние поверхности ВПП.

Для описания сущности «экспертная система» введем класс «база знаний», включающий в себя подклассы «правила MEL», «правила руководства по летной эксплуатации ВС» и «правила эксплуатанта».

4. ОНТОЛОГИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ В СРЕДЕ PROTÉGÉ

Онтология предметной области создавалась с применением программного обеспечения Protégé версии 5.5.0, поскольку данный редактор сопровождается обширной и детальной документацией, поддерживается значительным сообществом, состоящим из разработчиков и учёных, правительственных и корпоративных пользователей, использующих его для решения задач, связанных со знаниями в таких разнообразных областях, как биомедицина, сбор знаний и корпоративное моделирование, а также доступен для свободного скачивания с официального сайта вместе с плагинами и онтологиями [5].



Рис. 1. Фрагмент онтологического представления (1)

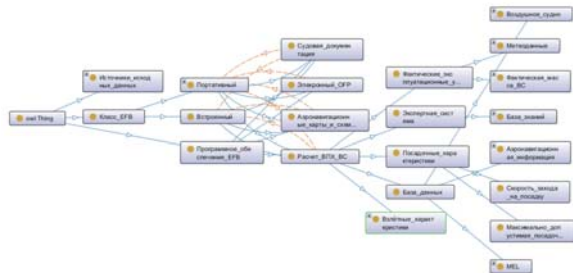


Рис. 2. Фрагмент онтологического представления (2)

Полученный результат формализации онтологии в среде Protégé представлен в виде графа на рисунках 1, 2 и 3.

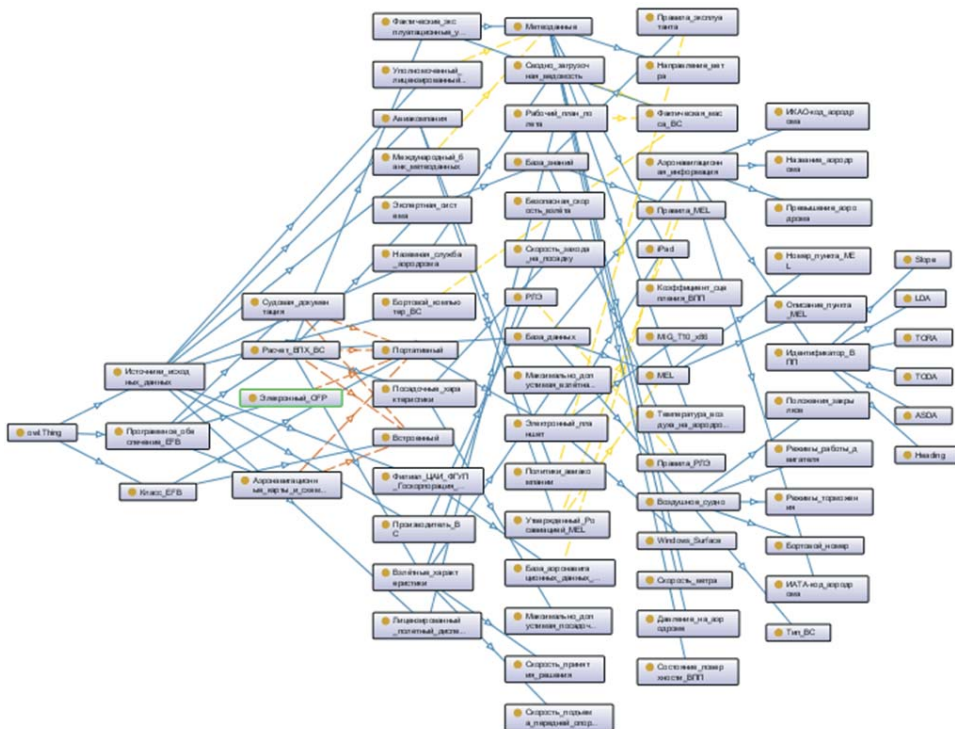


Рис. 3. Граф онтологического представления предметной области EFB

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение онтологического подхода позволило описать предметную область систем EFB, а разработанная онтология была успешно использована в разработке программного приложения EFB для расчета взлетно-посадочных характеристик воздушных судов, рассмотренного в [7–9].

Рассмотренная онтология в дальнейшем будет расширена за счет включения дополнительных классов и сущностей, выявления и установления дополнительных зависимостей между ними, что в конечном итоге позволит сформировать фундамент комплексного унифицированного подхода к разработке отечественных систем EFB, позволяя быстрее и с меньшими затратами ресурсов осуществлять как их разработку, так и внедрение.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ проект № 18–00–00012 (18–00–00011) КОМФИ.



Литература

1. Мельничук А.В., Судаков В.А. Предпосылки создания системы автоматизированного расчёта взлетно-посадочных характеристик воздушного судна // Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: В 4 т. М.: Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), 2016. – С.428–429.
2. Gruber T. A translation approach to portable ontology specification // Knowledge Acquisition. – 1993. – Vol. 5. – P.199–220.
3. Смирнов С.В. Онтологии как смысловые модели // Онтология проектирования. – 2013. – № 2(8). – С.12–19.
4. ICAODoc 10020 «Руководство по электронным полетным планшетам (EFB)» – 2016 // [электронный ресурс] – Режим доступа – URL:<http://dspk.cs.gkovd.ru/library/viewitem.php?id=1082> (дата обращения 20.09.19).
5. Официальный сайт сообщества Protégé // [электронный ресурс] – Режим доступа – URL: <https://protege.stanford.edu/> (дата обращения 20.03.20).
6. Мельничук А.В., Марценюк Е.А. Предпосылки создания ЭС для определения требуемых характеристик процесса взлета/посадки ВС в зависимости от погодных условий и конкретных параметров взлетно-посадочной полосы // 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2017»: Сборник тезисов докладов, Москва: Типография «Люксор», 2017. – С.174–175.
7. Мельничук А.В., Нестеров В.А., Судаков В.А., Сыпало К.И. Разработка экспертной системы электронного планшета летчика (EFB) для определения рациональных характеристик процессов взлета и посадки воздушных судов // 11-я международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018): Труды конференции, в 3 т. – Москва: ИПУ РАН, 2018. – Т.2. – С.310–316.
8. Мельничук А.В., Нестеров В.А., Судаков В.А., Сыпало К.И. Разработка приложения для определения рациональных характеристик процессов взлета и посадки воздушных судов с применением экспертной системы // Ежеквартальный научный журнал «Электронные информационные системы». – Москва: АО «НТЦ ЭЛИНС», 2019. № 1 (20). С.63–72.
9. Мельничук А.В., Нестеров В.А., Судаков В.А., Сыпало К.И. Разработка программного приложения планшетного компьютера для определения параметров взлета и посадки воздушных судов // Труды XIII Всероссийского совещания по проблемам управления. С.940–945.



Application of an Ontological Approach to Process of Development and Implementation of Electronic Flight Bag Systems

Melnichyuk A.V.*

Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia,
e-mail: alexander.melnichyuk@gmail.com

Sudakov V.A.**

Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia,
Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1658-1941>,
e-mail: sudakov@ws-dss.com

The paper considers application of an ontological approach to development and implementation of Electronic Flight Bag information systems (EFB). An ontology of EFB systems' subject area with description of a conceptual model of EFB software application for take-off and landing characteristics calculations of aircraft has been developed. The ontology was formalized using Protégé software.

Keywords: ontology, take-off and landing characteristics, Protégé, Electronic Flight Bag, EFB.

References

1. Melnichyuk A.V., Sudakov V.A. Predposylki sozdaniya sistemy avtomatizirovannogo raschjota vzletno-posadochnyh harakteristik vozdušnogo sudna // Gagarinskie chteniya – 2016: XLII Mezhdunarodnaja molodjozhnaja nauchnaja konferencija: Sbornik tezisov dokladov: V 4 t. M.: Moskovskij aviacionnyj institut (Nacional'nyj issledovatel'skij universitet), 2016. – pp. 428–429.
2. Gruber T. A translation approach to portable ontology specification. Knowledge Acquisition. – 1993. – Vol. 5. – P. 199–220.
3. Smirnov S.V. Ontologii kak smyslovyje modeli. // Ontologija proektirovanija. – 2013. – № 2(8). – pp.12–19.

For citation:

Melnichyuk A.V., Sudakov V.A. Application of an Ontological Approach to Process of Development and Implementation of Electronic Flight Bag Systems. *Modelirovanie i analiz dannyxh = Modelling and Data Analysis*, 2020. Vol. 10, no. 1, pp. 157–165. DOI: 10.17759/mda.2020100110 (In Russ., abstr. In Engl.)

***Melnichyuk Alexander Vladimirovich**, graduate student, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, e-mail: alexander.melnichyuk@gmail.com

****Sudakov Vladimir Anatolievich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Leading Researcher, Keldysh Institute of Applied Mathematics (Russian Academy of Sciences), Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1658-1941>, e-mail: sudakov@ws-dss.com



4. ICAO Doc 10020 «Rukovodstvo po jelektronnym poletnym planshetam (EFB)» – 2016. [jelektronnyj resurs] – Rezhim dostupa – URL: <http://dspk.cs.gkovd.ru/library/viewitem.php?id=1082> (data obrashhenija 20.09.19).
5. Oficialnyj sait soobshchestva Protégé [jelektronnyj resurs] – Rezhim dostupa – URL: <https://protege.stanford.edu/> (data obrashhenija 20.03.20).
6. Melnichyuk A.V., Marcenjuk E.A. Predposylki sozdaniya JeS dlja opredelenija trebuemyh harakteristik processa vzleta / posadki VS v zavisimosti ot pogodnyh uslovij I konkretnyh parametrov vzletno-posadochnoj polosy. 16-ja Mezhdunarodnaja konferencija «Aviacija I kosmonavtika – 2017»: Sbornik tezisov dokladov, Moskva: Tipografija «Ljuksor», 2017. – pp.174–175.
7. Melnichyuk A.V., Nesterov V.A., Sudakov V.A., Sypalo K.I. Razrabotka jekspertnoj sistemy jelektronnogo plansheta letchika (EFB) dlja opredelenija racional'nyh harakteristik processov vzleta I posadki vozdushnyh sudov. 11-ja mezhdunarodnoj konferencii «Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnyh sistem» (MLSD'2018): Trudy konferencii, v 3 t. – Moskva: IPU RAN, 2018. – T.2. – pp.310–316.
8. Melnichyuk A.V., Nesterov V.A., Sudakov V.A., Sypalo K.I. Razrabotka prilozhenija dlja opredelenija racional'nyh harakteristik processov vzleta I posadki vozdushnyh sudov s primeneniem jekspertnoj sistemy. Ezhekvtartal'nyj nauchnyj zhurnal «Jelektronnye informacionnye sistemy». – Moskva: AO «NTC JeLINS», 2019. № 1 (20). pp.63–72.
9. Melnichyuk A.V., Nesterov V.A., Sudakov V.A., Sypalo K.I. Razrabotka programmnoho prilozhenija planshetnogo komp'jutera dlja opredelenija parametrov vzleta i posadki vozdushnyh sudov. Trudy XIII Vserossijskogo soveshhanija po problemam upravlenija. pp.940–945.

Мобильное приложение DiaPsy для улучшения самоконтроля диабета и психологической поддержки людей с сахарным диабетом 1 типа

Мосин И.С.*

МГППУ, Москва, Россия
e-mail: lossdemoss@gmail.com

В статье описаны системные решения и принципы построения мобильного приложения для людей с сахарным диабетом 1 типа, которые обеспечивают решение проблемы организации дневника самоконтроля, визуализации показателя сахара относительно времени, расчёта хлебных единиц и организации психологической поддержки.

Ключевые слова: Информационная система, информационное обеспечение, мобильное приложение, организация баз данных, сахарный диабет 1 типа, дневник самоконтроля, психологическая поддержка.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сахарный диабет 1 типа – хроническое неизлечимое заболевание, характеризующееся повышенным содержанием сахара в крови, которое возникает в результате разрушения клеток поджелудочной железы, синтезирующих инсулин [3]. В России на начало 2018 года по данным Федерального регистра сахарного диабета насчитывается 4,5 млн. пациентов с диабетом, из них около 256 тыс. – с сахарным диабетом 1 типа (Далее – СД 1 типа), а детей и подростков – около 33 тыс. [1]. Лечение СД 1 типа предполагает эффективный самоконтроль пациента и правильный подбор инсулина. При нерегулярном самоконтроле и низкой приверженности к лечению возникают серьезные осложнения, которые снижают качество жизни и влияют на ее продолжительность [4]. Немаловажно и психологическое состояние человека, которое может

Для цитаты:

Мосин И.С. Мобильное приложение DiaPsy для улучшения самоконтроля диабета и психологической поддержки людей с сахарным диабетом 1 типа // Моделирование и анализ данных. 2020. Том 10. № 1. С. 166–175. DOI: 10.17759/mda.2020100111

***Мосин Игорь Сергеевич**, студент 1 курса, Московский государственный психолого-педагогический университет, Москва, Россия, e-mail: lossdemoss@gmail.com



быть нестабильным в процессе принятия болезни и при длительном стаже диабета. Подростку и его семье необходима психологическая поддержка для адаптации к новым условиям жизни с диабетом и постепенного выхода из кризисной ситуации [2]. Молодые люди являются активными пользователями мобильных приложений в своей повседневной жизни. Поэтому идея разработки приложения, призванного улучшать эмоциональное состояние и поддерживать молодых людей с сахарным диабетом 1 типа на жизненном пути, крайне актуальна.

Моей сестре Алёне 21 год. Она пишет стихи, картины, учится на 4-ом курсе в МГППУ, ведёт блог в Instagram, занимается танцами. Каждый день она следит за количеством сахара в крови, высчитывает хлебные единицы (далее – ХЕ (1 ХЕ = 10–12 г. углеводов)) и единицы инсулина. Сахарный диабет – одна из частей её жизни, и она отнюдь не проста. Когда я начал интересоваться технологиями, я заметил, что большинство из повседневных задач человека с СД 1 типа формализуемы и их решение, которое помогло бы людям вести дневники и высчитывать углеводы, вполне возможно реализовать в каком-либо программном продукте. Очевидно, что такое приложение должно всегда быть под рукой, но при этом иметь достаточно мощный и простой в обращении функционал. Единственным целесообразным решением будет разработка под мобильные устройства. Так родилась идея создания приложения DiaPsy.

2. АНАЛИЗ РЫНКА ПРИЛОЖЕНИЙ

На момент зарождения идеи на рынке была представлена масса программных решений для мобильных устройств. Для детальной характеристики некоторых популярных приложений для людей с сахарным диабетом была разработана сравнительная таблица.

Приложение	Калькулятор расчёта ХЕ	База данных продуктов	Добавление собственных продуктов	Калькулятор расчёта болюса	Расширенные настройки исходных данных	Визуализация данных (Диаграммы, графики)	Возможность синхронизации и трансляции	Особые возможности	Стоимость в год	Недостатки
ХЕшка	-	-	-	-	-	-	-	Кнопка «SOS», Психологическая и медицинская поддержка	Бесплатно	Низкий функционал
Diabetes.M	+	-	\$	+	+	\$	-	База различных инсулиновых помп и коротких инсулинов	1699 рублей	Высокая стоимость, нет базы продуктов
mySugr	\$	\$	\$	\$	-	\$	-	Игровой, мотивационный контент	2295 рублей	Высокая стоимость, нет трансляции данных и ведения исходных данных
DiaMeter	+	-	-	+	\$	\$	\$	Интерактивные обучающие статьи «Школа Диабета»	2000 рублей	Нет базы продуктов, неудобный калькулятор расчёта ХЕ и болюса
Glucose Buddy Diabetes Tracker	+	+	\$	+	+	\$	-	Расчёт гликированного гемоглобина HbA1c.	4190 рублей	Самая дорогая подписка, нет синхронизации и трансляции
ДиабетСтудия	-	-	-	+	+	+	+	Быстрый поиск по тегам, уникальный расчёт болюса	Бесплатно	Отсутствие калькулятора ХЕ и базы продуктов
DiaPsy	+	+	+	-	-	+	-	Психологическая поддержка, калькулятор ХЕ, меню ресторанов с ХЕ.	Бесплатно	

Рис. 1. Сравнительная таблица мобильных приложений для людей с СД 1 типа



Сравнительный анализ позволил выявить основные недостатки, которые я учел при разработке своего проекта. Так, ни в одном из приложений нет изначальной базы продуктов, удобного калькулятора расчета хлебных единиц. Также не встретилось приложений, которые оказывают психологическую поддержку в принятии проблемы и жизни с диабетом. К тому же, многие функции приложений не предоставляются бесплатно.

3. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ

Невозможно было перейти к созданию какого-либо продукта без выделения каждодневных потребностей человека с СД 1 типа. Итак, рассмотрим данные потребности и их возможные технические решения с помощью функций будущего мобильного приложения «DiaPsy»:

- 1) Ведение дневника самоконтроля. Электронный дневник самоконтроля позволяет быстро вносить и сохранять данные (Сахар крови, единицы длинного и короткого инсулинов, ХЕ) в любой момент, которые необходимы диабетику для контроля компенсации и своевременной коррекции инсулинотерапии.
- 2) Высчитывание ХЕ при приёме пищи. Специальная форма для вычисления ХЕ, соединённая с базой данных содержания ХЕ в продуктах, позволит быстро и удобно рассчитать ХЕ в порции.
- 3) Для точного подсчёта ХЕ необходимо полагаться на специально разработанные таблицы хлебных единиц, но чаще всего, в них нет сложных блюд и количество ХЕ в них приходится высчитывать самостоятельно. Необходимо создать структурированную базу данных о содержании ХЕ в основных продуктах, внести в неё меню некоторых сетевых ресторанов с подсчётом ХЕ в блюде, а также создать специальную форму для добавления пользователем данных о содержании ХЕ в новом продукте.
- 4) Необходимость в наблюдении тенденции колебания сахара в течение дня или нескольких суток для оптимизации инсулинотерапии и своевременной коррекции высоких или низких значений. Визуализировать данные можно при помощи графиков (гликемических профилей / «сахарных кривых»), на которых будут наглядно представлены колебания сахара крови относительно времени.
- 5) Нужда в психологической поддержке в связи с хроническим заболеванием. Можно реализовать при помощи размещения статей на тему психологии диабета и ссылка на страницу психолога, на которой можно задать вопрос специалисту.

На этапе разработки концепта была сформирована следующая таблица основных активностей приложения:

Таблица 1

Функции мобильного приложения DiaPsy

Основная активность	Функции
Дневник самоконтроля	✓ Ввод и сохранение замеров сахара крови в базе данных
	✓ Возможность удаления записи
	✓ Просмотр записей дневника в удобной форме
Статистика	✓ График замеров в режиме реального времени
	✓ Функция наложения графиков гликемических профилей за 3 дня



Основная активность	Функции
База продуктов	<ul style="list-style-type: none">✓ Сортированная база продуктов✓ Возможность добавлять в память базы любые продукты✓ Калькулятор расчета ХЕ✓ База блюд сетевых ресторанов (с количеством ХЕ в порции)
Психологическая поддержка	<ul style="list-style-type: none">1 рецепт «Как принять диабет?»2 рецепт «Почему Я?»3 рецепт «Стоит ли скрывать диабет от окружающих?»4 рецепт «Как сказать о своем диабете окружающим?»5 рецепт «Если ты устал...»6 рецепт «Свобода – разумная ответственность».7 рецепт «На каждый день».✓ Активная ссылка на страницу автора статей, возможность задать свой вопрос психологу онлайн.

4. ПРОГРАММНОЕ РЕШЕНИЕ

Каждую функцию мобильного приложения решено было вынести в отдельные окна приложения (Activity) для удобства пользования и переключения между функциями. Так, в навигационное боковое меню были внесены разделы: Дневник (ZamerListActivity), Статистика (Stats), Психология (Psychology), Меню ХЕ (BUMenu), Задать вопрос психологу (Question), а также дополнительные разделы: Об авторе статей (AboutSpec), От разработчика (Thanks).

Для более понятного описания принципов работы приложения и связи между его элементами была построена структурная схема, отображающая созданное программное решение.

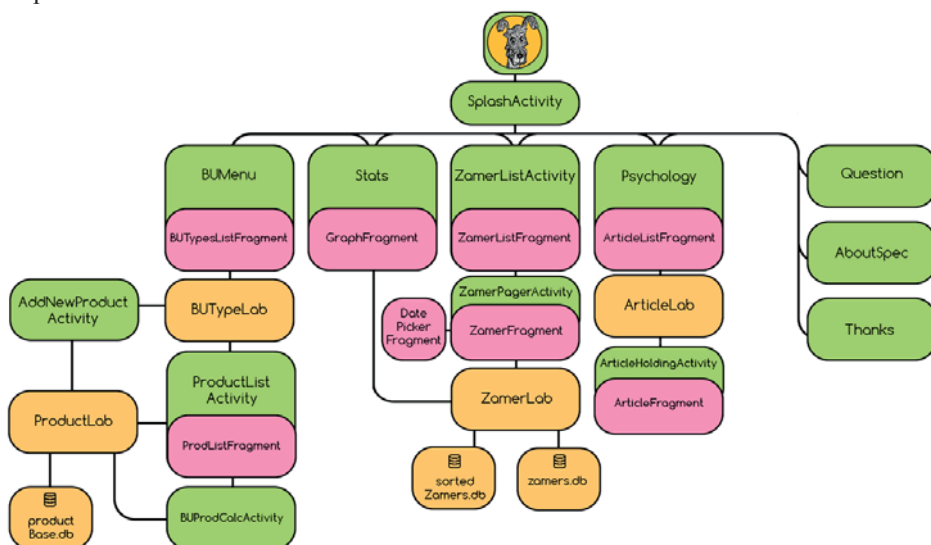


Рис. 2. Структурная схема мобильного приложения

Зелёным показаны Activity приложения, розовым – фрагменты (прямоугольником внутри прямоугольника показывается удержание/управление (inflation) фрагмента при помощи Activity), оранжевым – вспомогательные классы приложения (т. н. лаборатории/фабрики) и базы данных, пути передачи информации показаны чёрными линиями. Для лучшего понимания структуры приложения, в скобках или в тексте будут указываться названия элементов так, как они обозначены в структурной схеме. Скриншоты перенесены в Приложение.

Пользователя, зашедшего в приложение, встречает заставка (SplashActivity) с анимированным персонажем DiaPsy, над ним появляется одна из 25 заложенных мотивационных фраз (рис. 3), которые способствуют оптимистическому настрою человека в течение дня.

По завершению заставки открывается Activity Дневника самоконтроля (ZamerListActivity), который, в зависимости от пустоты базы замеров, показывает инструкцию о создании нового замера (рис. 4) или список внесённых замеров (рис. 5).



Рис. 3. Мотивационные фразы



Рис. 4. Инструкция для нового замера

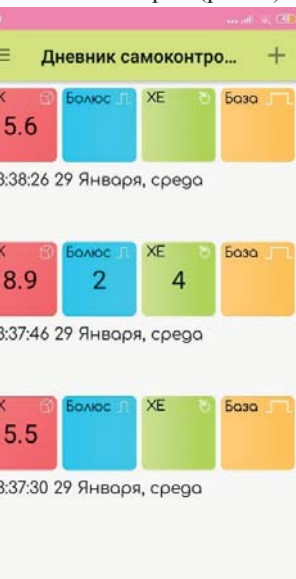


Рис. 5. Список внесённых замеров

Замер–запись в дневнике, содержащая следующие данные: сахар крови, ХЕ, количество единиц короткого и длинного инсулинов, тип замера (до еды, после еды, сон, активность) и дата замера. При нажатии на элемент списка (ZamerListFragment), открывается Activity детализации замера (ZamerPagerActivity), в которой можно изменить или удалить текущий замер (рис. 6). При этом, все поля для изменения данных замера находятся в фрагменте ZamerFragment. Эта же Activity открывается при добавления нового замера.

После изменения или создания нового замера данные попадают в метод класса ZamerLab, где проходят обработку, а затем записываются в SQLite базу данных zamers.

db. После добавления замера базы данных обновляются: список замеров собирается, сортируется и добавляется в отсортированную базу данных sortedZamers.db. Такая система была создана для корректного отображения графиков в Activity Статистика (Stats).

Activity Статистика удерживает фрагмент GraphFragment (рис. 7). Во фрагменте находятся два графика из сторонней библиотеки GraphView. На одном из графиков предоставлено колебание уровня сахара в крови за последние 24 часа, на втором – гликемические профили за последние 3 дня. Профиль за каждый день помечен цветом (синий – сегодня, красный – вчера, зелёный – позавчера). Наложение гликемических профилей даёт возможность сравнительного анализа колебаний уровня сахара за несколько дней. Нажатие на точки на графике позволяет увидеть информацию о замере. Инструменты библиотеки GraphView позволяют построить график только по двумерному массиву. Такой массив формируют методы ZamerLab, собирая данные из sortedZamers.db.

Activity Психология (Psychology) (рис. 8) управляет фрагментом ArticleListFragment. Во фрагменте содержится список психологических мини-статей. Каждый элемент списка отображает заголовок статьи, иллюстрацию и небольшой фрагмент текста.

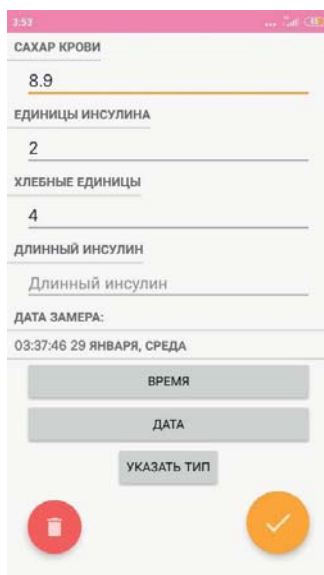


Рис. 6. Детализация замера

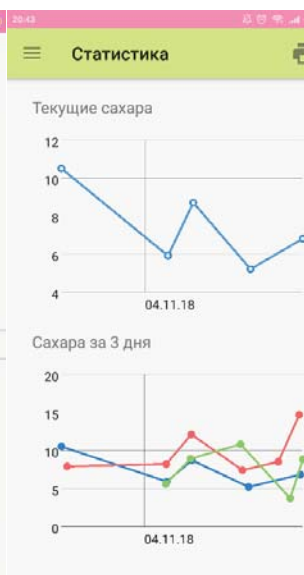


Рис. 7. Статистика



Рис. 8. Психология

При нажатии на фрагмент списка номер статьи передаётся в класс ArticleLab, который выбирает номер статьи из заданного массива. После формирования статьи ArticleLab открывает ArticleHoldingActivity, содержащую детализацию статьи в ArticleFragment (рис. 9).

Меню XE (BUMenu) имеет сложную структуру. При открытии Activity BUTypeLab передаёт список типов продуктов, который открывается в удерживаемом фрагменте BUTypesListFragment (рис. 10). При нажатии на определённый тип продуктов,



BUProdLab создаёт список продуктов, входящих в тип. Этот список затем отображается визуально в ProdListFragment (рис. 11).



Рис. 9. Детализация статьи

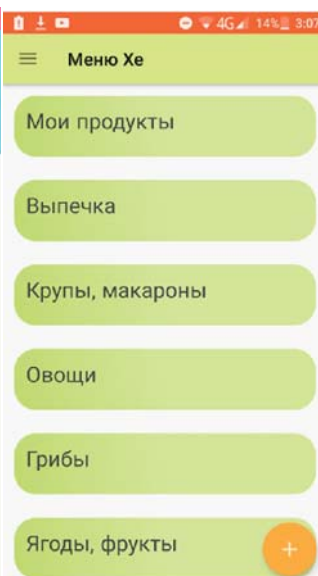


Рис. 10. Типы продуктов



Рис. 11. Список продуктов

Для того, чтобы открыть Калькулятор ХЕ (CalcActivity), необходимо нажать на один из элементов списка. Данные продукта используются для расчёта граммовки продукта на определённое количество хлебных единиц (рис. 12).

Также у пользователя есть возможность добавлять свои продукты и рассчитывать по введённым данным. При нажатии на кнопку внизу Меню ХЕ BUProdLab создаёт запись в productBase.db, открывается AddNewProductActivity, являющаяся детализацией продукта (рис. 13). Продукты, добавленные таким образом, попадают в тип «Мои продукты».

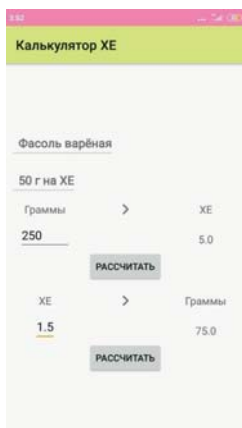


Рис. 12. Расчёт граммовки продукта

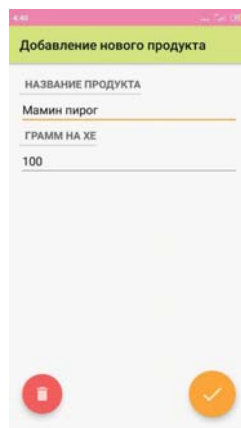


Рис. 13. Детализация продукта



Activity Question открывает окно браузера и пользователь попадает на страницу сайта АНО поддержки людей с сахарным диабетом ДиаСоюз, где он может задать вопрос клиническому психологу по любой волнующей его проблеме.

5. АПРОБАЦИЯ ПРОДУКТА

1 декабря 2018 года была проведена презентация мобильного приложения DiaPsy для молодых людей с сахарным диабетом и их родителей в АНО «ДиаСоюз». На презентации присутствовало 10 подростков с диабетом, 8 детей и 19 взрослых (родители). Участники установили приложение «DiaPsy» на свои телефоны и протестировали работу приложения и его функций, дали свою оценку с помощью ответов на вопросы анкет, а также письменных отзывов. По итогам тестирования приложения пользователями, была дана высокая оценка работы приложения и функции психологической поддержки, а также получены положительные отзывы. При этом 79 % респондентов посчитали значимой возможность задать свой вопрос психологу. Также около 85 % респондентов отметили, что посоветуют установить «DiaPsy» своим друзьям или знакомым с диабетом.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистика свидетельствует о значительном росте заболеваемости диабетом и по прогнозам специалистов к 2030 году число больных в РФ увеличиться на 1,3 миллиона. Компенсация сахарного диабета (стабильный сахар крови) позволяет человеку прожить долгую жизнь без осложнений. При сахарном диабете 1 типа компенсация напрямую зависит от адекватного отношения пациента к болезни и понимания механизмов инсулинотерапии, а также степени принятия диабета и психологического состояния.

Мобильное приложение «DiaPsy» оказывает психологическую поддержку, способствует принятию диабета, помогает улучшить компенсацию и повысить приверженность к лечению, опосредованно повышая качество жизни молодых людей с сахарным диабетом.

Размещение приложения на Google Play делает продукт доступным и безопасным для пользователя. На 1 февраля 2020 г. по запросу диабет приложение DiaPsy занимает 11 строчку списка. Приложение скачано более 1500 раз, что свидетельствует о высокой потребности людей с сахарным диабетом в подобных мобильных приложениях. Приложение опубликовано на площадке Google Play, где его можно скачать и установить на мобильное устройство бесплатно.

Литература

1. Детский диабет: методы лечения и психологическая поддержка [Электронный ресурс] // РИА Новости. Материал подготовлен на основе информации РИА Новости и открытых источников. – URL: https://ria.ru/sn_health/20171111/1508542935.html. (Дата обращения: 13.08.2018).
2. Кудрявцева С.В. Отношение к болезни и социально-психологическая адаптация у лиц, страдающих инсулинозависимым сахарным диабетом / С.В. Кудрявцева,



- С.К. Ершова // Сборник научных статей. Актуальные проблемы психосоматики в общемедицинской практике, Санкт-Петербург, ноябрь, 2014 г. – Вып. XIV. / Под общей редакцией акад. РАН Мазурова В.И. – СПб. изд-во «Альта Астра» – 2014. (Программа «Психосоматическая медицина»). – С. 106–109.
3. *Филлипс Б.* Android. Программирование для профессионалов / Б. Филлипс, К. Стюарт, К. Марсикано. – 3-е изд. – СПб.: Питер, 2018. – 688 с.: ил. – (Серия «Для профессионалов»)
 4. *Шапошникова Т.Д.* Диабет: Вы и Ваш ребенок / Т.Д. Шапошникова, Э.А. Войчик, С.Б. Гнедова, Е.А. Одул и др. – М.: Арт-Бизнес-Центр, 2003. – 109 с. и прил. 11 с.
 5. *Шишкова Ю.А.* Качество жизни больных сахарным диабетом 1 типа молодого возраста / Ю.А. Шишкова, Е.В. Суркова, О.Г. Мотовилин, А.Ю. Майоров и др. // Сахарный диабет. 2010. № 4. С. 43–47.



The DiaPsy Mobile App for Improving Self-Control of Diabetes and Psychological Support for People with Type 1 Diabetes

Mosin I.S.*

MSUPE, Moscow, Russia,
e-mail: lossdemoss@gmail.com

The article presents decisions and principles of building mobile application for people with diabetes type 1, which provides the solution of the problems of organization of the self-control diary, visualization of indicator of sugar in the blood relatively to time, calculation of bread units and organization of psychological support.

Keywords: Information system, information support, mobile app, database organization, type 1 diabetes, self-control diary, psychological support.

References

1. Detskii diabet: metody lecheniya i psikhologicheskaya podderzhka [Elektronnyi resurs]. RIA Novosti. Material podgotovlen na osnove informatsii RIA Novosti i otkrytykh istochnikov. – URL: https://ria.ru/sn_health/20171111/1508542935.html. (Data obrashcheniya: 13.08.2018).
2. Kudryavtseva S.V. Otnoshenie k bolezni i sotsial'no-psikhologicheskaya adaptatsiya u lits, stradayushchikh insulinozavisimym sakharnym diabetom. S.V. Kudryavtseva, S.K. Ershova. Sbornik nauchnykh statei. Aktual'nye problemy psikhosomatiki v obshchemeditsinskoj praktike, Sankt-Peterburg, noyabr', 2014 g. – Vyp. XIV. Pod obshechi redaktsiei akad. RAN Mazurova V.I. – SPb. izd-vo «Al'ta AstrA» – 2014. (Programma «Psikhosomaticheskaya medit-sinA»). – p. 106–109.
3. Fillips B. Android. Programirovanie dlya professionalov. B. Fillips, K. Styuart, K. Marsikano. – 3-e izd. – SPb.: Piter, 2018. – 688 p.: il. – (Seriya «Dlya professionalov»)
4. Shaposhnikova T.D. Diabet: Vy i Vash rebenok. T.D. Shaposhnikova, Eh. A. Voichik, S.B. Gnedova, E.A. Odul i dr. – M.: Art-Biznes-Tsentr, 2003. – 109 p. i pril.11 s.
5. Shishkova Yu.A. Kachestvo zhizni bol'nykh sakharnym diabetom 1 tipa molodogo vozrasta. Yu.A. Shishkova, E.V. Surkova, O.G. Motovilin, A. Yu. Maiorov i dr.. Sakharnyi diabet. 2010. № 4. pp. 43–47.

For citation:

Mosin I.S. The DiaPsy Mobile App for Improving Self-Control of Diabetes and Psychological Support for People with Type 1 Diabetes. *Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis*, 2020. Vol. 10, no. 1, pp. 166–175. DOI: 10.17759/mda.2020100111 (In Russ., abstr. In Engl.)

***Mosin Igor Sergeevich**, 1st year student, Moscow state University of Psychology and Education, Moscow, Russia, e-mail: lossdemoss@gmail.com

Информационная система для учебно-методической поддержки дисциплины «Численные методы линейной алгебры»

Нуркаева И.М.*

МГППУ, Москва, Россия,
e-mail: nurkaevaim@yandex.ru

Корчагина К.А.**

МГППУ, Москва, Россия,
e-mail: vereinaka@mgppu.ru

В статье рассматриваются вопросы разработки информационной системы для учебно-методической поддержки дисциплины математического цикла. Определены основные требования для разрабатываемой дисциплины.

Ключевые слова: Информационная система, самоконтроль, тестирование, обучение, информационные технологии, интернет.

1. ВВЕДЕНИЕ

При поступлении на обучение, каждый человек хочет добиться успехов в выбранной профессии. Но, для получения качественного образования в высших учебных заведениях и последующего успешного трудоустройства по профессии, необходимы уверенные знания основ, которые задаются ребенку еще в школе.

В современном образовании существует программы по оценке учебных достижений учащихся. Одной из таких программ является PISA – Международная программа по оценке образовательных достижений обучающихся.

Она ставит своей целью определить образовательные достижения 15-летних обучающихся в области чтения, математики и естествознания всех организаций образования.

Для цитаты:

Нуркаева И.М., Корчагина К.А. Информационная система для учебно-методической поддержки дисциплины «Численные методы линейной алгебры» // Моделирование и анализ данных. 2020. Том 10. № 1. С. 176–188. DOI: 10.17759/mda.2020100112

***Нуркаева Ирина Михайловна**, к.п.н., доцент кафедры прикладной информатики и мультимедийных технологий ФГБОУ ВО Московский государственный психолого-педагогический университет, Москва, Россия, e-mail: nurkaevaim@yandex.ru

****Корчагина Кристина Алексеевна**, специалист по учебно-методической работе факультета ИТ ФГБОУ ВО Московский государственный психолого-педагогический университет, Москва, Россия, e-mail: vereinaka@mgppu.ru



Само исследование проводится циклами – каждые три года начиная с 2000 г. Последний виток цикла проходил в 2018 году. В рамках программы отбираются учащиеся 74 странах мира, возрастом 15 лет и далее путем решения различных типов задач у них пытаются выявить уровни грамотности:

- Математическая.* Которая позволяет не только выявить способность человека интерпретировать математику, но и выражать и применять ее в разнообразных случаях и областях. Данные задания включают в себя математические рассуждения, использование математических понятий, процедур, фактов и инструментов для описания, объяснения и предсказания явлений.
- Естественнонаучная.* Отображает готовность и способность человека проявить интерес к естественнонаучным идеям и его умение занимать активную гражданскую позицию по вопросам, связанным с естественными науками.
- Читательская.* Это базовая способность человека к пониманию, использованию письменных текстов, размышление о них, чтением с целью достижения своих планов, расширения своих знаний и возможностей, позволяющая быть полноценным членом социума;
- Финансовая и компьютерная грамотность* (с 2018 года).

Если обратиться к данным исследования PISA за 2015 и 2018 года, то можно заметить, что уровень подготовки испытуемых в России по пункту «Математическая грамотность», на фоне большинства развитых стран, ниже.

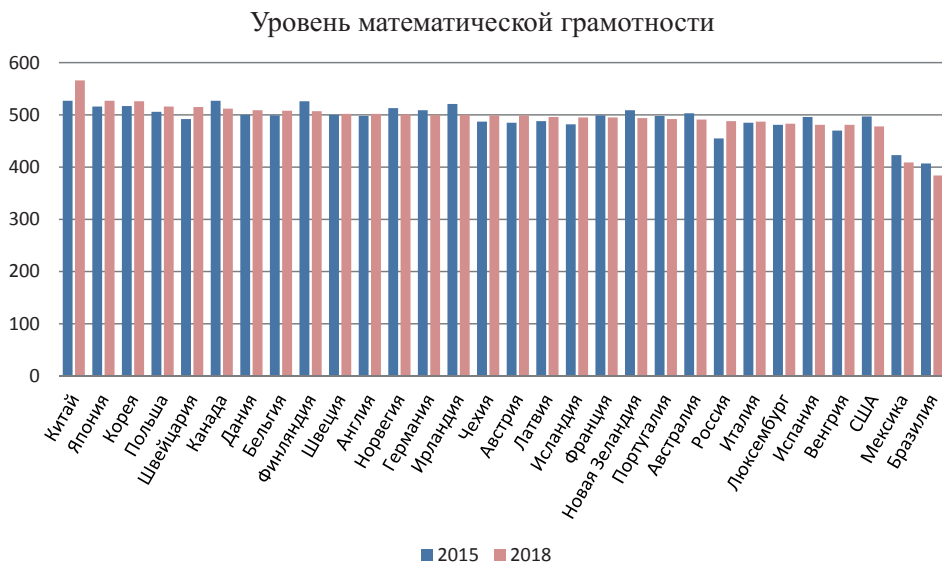


Рис. 1. Рейтинг стран по данным исследования PISA

С целью повышения качества обучения студентов по дисциплине «Численные методы линейной алгебры» и организации обратной связи, за счет оперативного решения комплекса задач по сбору, хранению, накоплению, актуализации информации,



было решено разработать информационную систему учебно-методической поддержки вышеназванной дисциплины с применением современных веб-технологий [5].

2. СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Информационная система для учебно-методической поддержки дисциплины «Численные методы линейной алгебры» рассчитана на 2 категории пользователей: студент, преподаватель. Для каждого реализован личный кабинет пользователя.

При разработке информационных систем для моделирования вариантов использования применяется диаграмма Use Case, которая спроектирована на свободной программной платформе StarUML (рис. 2).

Преподаватель имеет уровень доступа, который открывает для него следующие функции:

- a) Редактирование содержания информационной системы:
 1. добавление материала;
 2. удаление материала.
- b) Заполнение журнала:
 1. учет посещаемости;
 2. контроль успеваемости.
- c) Консультация студентов.

Посетитель имеет возможность ознакомиться с теоретическими материалами, представленными в информационной системе.

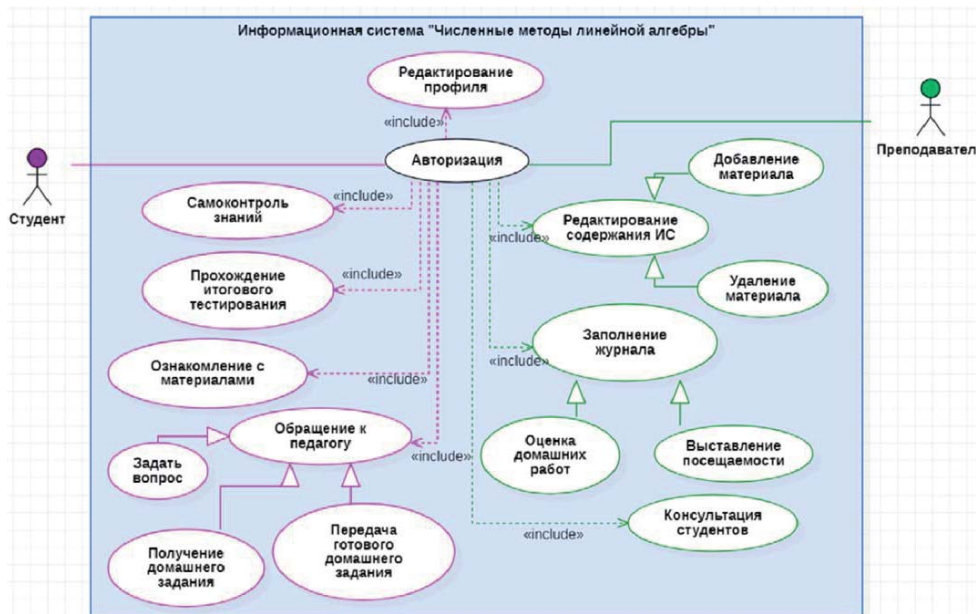


Рис. 2. Use Case-диаграмма вариантов использования информационной системы

Студенту необходимо пройти регистрацию, после чего у него появляется тип доступа, позволяющий:

- ознакомление с теоретическим материалом;
- самоконтроль знаний;
- прохождение тестирования;
- обращение к преподавателю:
 - а) возможность задать вопрос;
 - б) получить задание на дом;
 - в) сдать готовое домашнее задание;
- редактирование профиля.

Все вышеописанные функции пользователей отображают ключевые возможности в системе.

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Проектирование информационной системы строилось с использованием методологий IDEF0 и DFD, которые позволяют создать модель функций процесса. Благодаря широкому функционалу, в качестве инструментального средства создания моделей использовался пакет BPWin [4].

Методология IDEF0 позволяет создать функциональную модель всех взаимодействующих в системе процессов. На диаграмме IDEF0 отображаются основные функции процесса, входы, выходы, управляющие воздействия и устройства, взаимосвязанные с основными функциями.



Рис. 3. Диаграмма IDEF0

На графической модели (рис. 3) рассмотрен учебный процесс при использовании информационной системы «Численные методы линейной алгебры». Этот



процесс регламентируется программой дисциплины, государственным образовательным стандартом и законом о сохранении личных данных. Обучение ведется под контролем преподавателя. На вход попадают студент и цели курса. На выходе студент и результаты освоения дисциплины.

Декомпозиция диаграммы IDEF0 процесса работы в информационной системе, позволит описать процесс обучения иерархически (рис. 4).

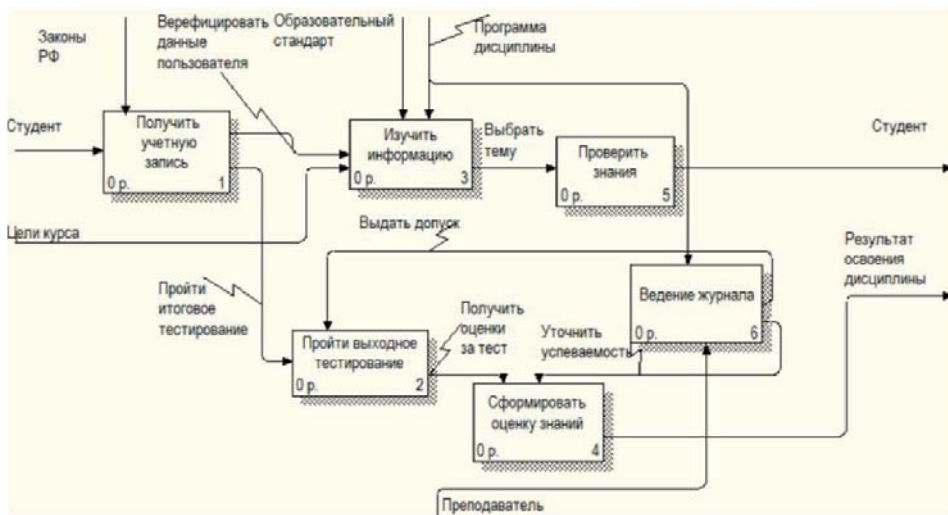


Рис. 4. Декомпозиция диаграммы IDEF0 для информационной системы

В представленной информационной системе преподаватель выступает, как механизм воздействия. Обязанностью преподавателя является ведение журнала учета посещаемости/ успеваемости студентов и выдача допуска для прохождения студентом тестирования по окончанию изучения дисциплины.

DFD–диаграмма для подпроцесса «Заполнение журнала» представлена на рисунке 5.

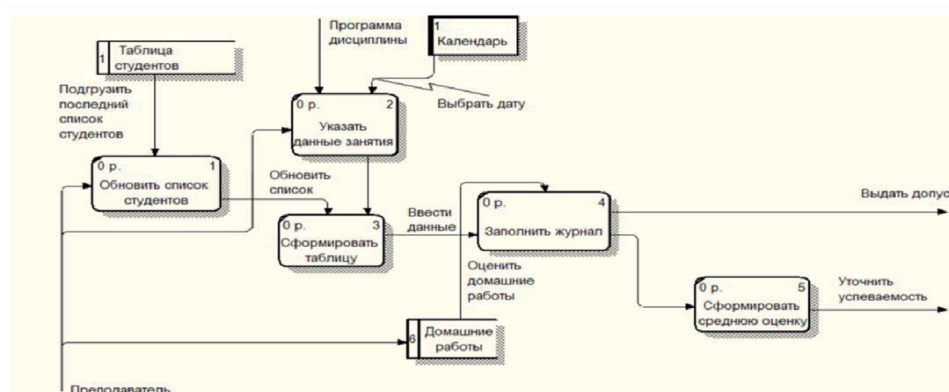


Рис. 5. Диаграмма DFD для процесса «Заполнение журнала»

Данные из журнала синхронизируются с базой данных, обновляется список студентов и информация по их успеваемости. Далее преподаватель может самостоятельно вносить изменения, на основании которых, система будет выводить допуск для каждого студента и формировать среднюю оценку.

После создания функциональной модели было выполнено проектирование базы данных системы (Рис. 6). При проектировании базы данных учитывались требования:

- в базе данных должна храниться вся необходимая информация;
- сокращение избыточности и дублирования данных;
- обеспечение целостности базы данных.

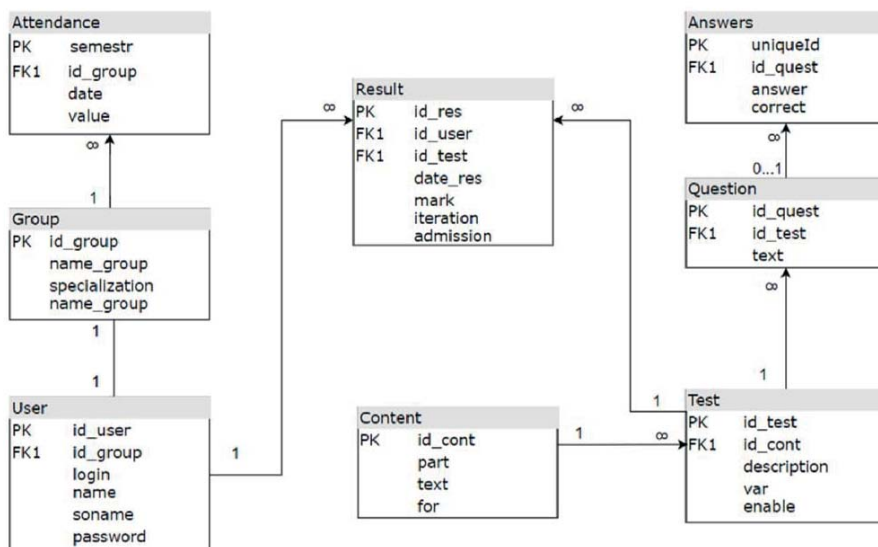


Рис. 6. Логическая модель базы данных

4. ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Следуя спроектированной информационной системе, было реализован web-ресурс для учебно-методической поддержки дисциплины «Численные методы линейной алгебры» с использованием следующих программных средств:

- для клиентской части приложения: язык разметки гипертекста HTML; каскадные таблицы стилей CSS; метаязык *Sass*, который выступает как промежуточное звено между таблицами стилей и сервером; скриптовый язык программирования JavaScript; технология Ajax, позволяющая обрабатывать обращение, организованное с помощью JavaScript к серверу, без перезагрузки страницы.
- для серверной части приложения: скриптовый язык программирования PHP,



Для хранения информации была выбрана СУБД *MySQL*. Для администрирования СУБД было выбрано веб-приложение *phpMyAdmin*, которое представляет собой полноценный интерфейс для администрирования сервера.

5. ОСНОВНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ

После авторизации на ресурсе студенту открывается возможность познакомиться с рабочей программой дисциплины, изучить теоретический материал, войти на персонализированную страницу.

Страницы с регистрацией и авторизацией пользователей выглядят стандартно, мы не будем на них останавливаться.

Персонализация происходит в личном кабинете. После авторизации пользователя, ему предоставляется возможность в личном кабинете получить задания для самостоятельной работы по теме, пройти самоконтроль по изученным темам, а так же обязательное тестирование, предложенное преподавателем.

На рисунке 7 представлен вариант заданий для самостоятельной работы пользователя. Решение данных задач позволяет закрепить навык каждой темы, представленной в информационной системе.

The screenshot shows a web interface for a university. On the left is a navigation menu with the following items: Меню, РАБОЧАЯ ПРОГРАММА, СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ (expanded), СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ, МЕТОД ГАУССА С ВЫБОРОМ ГЛАВНОГО ЭЛЕМЕНТА, ОБРАЩЕНИЕ МАТРИЦЫ, ВЫЧИСЛЕНИЕ ОПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ, ЗАДАЧИ К ТЕМЕ, ВЫЧИСЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ И ВЕКТОРОВ, ПРОВЕРЬ СЕБЯ, ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ, МАТЕРИАЛЫ, РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА. The main content area is titled 'Задачи к теме' and contains the instruction 'Решить системы линейных уравнений.' followed by eight numbered systems of linear equations:

- $$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 - x_3 + x_4 = 4, \\ 4x_1 + 3x_2 - x_3 + 2x_4 = 6, \\ 8x_1 + 5x_2 - 3x_3 + 4x_4 = 12, \\ 3x_1 + 3x_2 - 2x_3 + 2x_4 = 6. \end{cases}$$
- $$\begin{cases} 2x_1 + 5x_2 + 4x_3 + x_4 = 20, \\ x_1 + 3x_2 + 2x_3 + x_4 = 11, \\ 2x_1 + 10x_2 + 9x_3 + 7x_4 = 40, \\ 3x_1 + 5x_2 + 9x_3 + 2x_4 = 37. \end{cases}$$
- $$\begin{cases} 7x_1 + 9x_2 + 4x_3 + 2x_4 - 2 = 0, \\ 2x_1 - 2x_2 + x_3 + x_4 - 5 = 0, \\ 5x_1 + 6x_2 + 3x_3 + 2x_4 - 3 = 0, \\ 2x_1 + 3x_2 + x_3 + x_4 = 0. \end{cases}$$
- $$\begin{cases} 2x - y - 6z + 3t + 1 = 0, \\ 7x - 4y + 2z - 15t + 32 = 0, \\ x - 2y - 4z + 9t - 5 = 0, \\ x - y + 2z - 6t + 8 = 0. \end{cases}$$
- $$\begin{cases} 2x - y + 3z = 9, \\ 3x - 5y + z = -4, \\ 4x - 7y + z = 5. \end{cases}$$
- $$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 + 11x_3 + 5x_4 = 2, \\ x_1 + x_2 + 5x_3 + 2x_4 = 1, \\ 2x_1 + x_2 + 3x_3 + 2x_4 = -3, \\ x_1 + x_2 + 3x_3 + 4x_4 = -3. \end{cases}$$
- $$\begin{cases} 3x_1 + 4x_2 + x_3 + 2x_4 + 3 = 0, \\ 3x_1 + 5x_2 + 3x_3 + 5x_4 + 6 = 0, \\ 6x_1 + 8x_2 + x_3 + 5x_4 + 8 = 0, \\ 3x_1 + 5x_2 + 3x_3 + 7x_4 + 8 = 0. \end{cases}$$
- $$\begin{cases} 6x + 5y - 2z + 4t + 4 = 0, \\ 9x - y + 4z - t - 13 = 0, \\ 3x + 4y + 2z - 3t - 1 = 0, \\ 3x - 9y + 2t - 11 = 0. \end{cases}$$

Рис. 7. Примеры задач для самостоятельной работы

На странице пользователя содержатся регистрационные данные авторизованного аккаунта. Страница с личными данными пользователя не отличается от стандартных.

В ней студент может корректировать свои личные данные, кроме пароля в целях безопасности. Во второй части страницы идут результаты обучения пользователя (рис. 8). На ней отображаются результаты его тестирования, оценка за контрольную работу, и средний балл. Представленная информация синхронизируется с журналом преподавателя и базой данных.

Результаты обучения

Тип	Оценка	Верные ответы	Ошибки	Процент
Результат тестирования	12	40	10	80
Результат контрольной работы №1	14			
Результат контрольной работы №2	11			
Средний балл	12.5			

Спросить преподавателя

ЗДЕСЬ ВЫ МОЖЕТЕ ЗАДАТЬ СВОЙ ВОПРОС

Опишите в этом поле, Ваш вопрос. Вы также можете прикрепить сюда домашнее задание.

Выберите файл | Файл не выбран |

Рис. 8. Личный кабинет пользователя

Для обратной связи в кабинете студента предусмотрена форма «Спросить преподавателя». В системе она реализована при помощи RHPMailer. RHPMailer – библиотека, позволяющая прикреплять документы и отправлять письма через веб-приложение. И уже с помощью php к введенному сообщению автоматически добавляется электронный адрес и имя пользователя, который пишет письмо.

Самоконтроль

Раздел «Проверь себя» позволяет выявить недостатки в знаниях, понять какую тему повторить для подготовки к контрольным мероприятиям. В разработанной информационной системе самоконтроль представляет собой тестирование с закрытыми вариантами ответов.

Самоконтроль представлен по двум разделам дисциплины. Студент выбирает тему, после чего вопросы и варианты ответов выгружаются в массив. Отвечать на вопросы можно в произвольном порядке. Предусмотрена возможность завершить тестирование с любым количеством отмеченных ответов. Вопросы подаются последовательно или пользователь может выбрать любой вопрос и дать ответ на него (Рис. 9). Для решения этого вопроса мы подключили к тесту специальную навигационную панель – пагинацию. Она представляет собой список из номеров вопросов по порядку и позволяет представлять каждый вопрос в отдельном поле без перезагрузки системы.



Вычисление собственных значений и векторов

Всего вопросов 10

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Если матрица имеет две одинаковые строки, то ее определитель

- равен сумме элементов, стоящих на главной диагонали
- равен сумме элементов, стоящих на побочной диагонали
- равен нулю
- все ответы неверны

ЗАКОНЧИТЬ ТЕСТ

Рис. 9. Вариант вопроса на тему «Вычисление собственных значений и векторов»

Вопросы, на которые студент ответил верно, отображаются с зеленой заливкой (Рис. 10).

Упорядоченная совокупность элементов, у которых номера строки и столбца совпадают, называется

побочной диагональю матрицы

ненулевой матрицей

главной диагональю матрицы

диагональной матрицей

Рис. 10. Результат правильного ответа на вопрос

Если студент ответил неверно, его ответ будет красного цвета (Рис. 11).

При перестановке двух строк определитель

не изменяется

меняет свой знак

становиться отрицательным

увеличивается

Рис. 11. Результат неправильного ответа на вопрос

Выходное тестирование

В информационной системе предусмотрен контроль знаний в виде тестирования, за которое студент получает оценку, его результаты хранятся в системе.

Записи результатов тестирования хранятся в таблице itog (Рис. 6), которая содержит идентификатор пользователя, дату тестирования, количество верных ответов и номер попытки. У каждого пользователя есть два шанса сдать выходное тестирование.

Перед проведением тестирования пользователю предьявляется инструкция, в которой описаны критерии оценки (Рис. 12).

Вы должны выбрать один ответ из предлагаемых вариантов ответа на каждый вопрос. При этом только один из предложенных вариантов является правильным ответом. Выполнившим тест считается экзаменуемый, который ответил правильно не менее чем на 21 вопрос. Если Вы ответили верно на 80% вопросов и более, то Ваш ответ оценивается на 5 баллов. Если Ваш результат в диапазоне от 79% до 60%, то итоговый балл 4. От 35% до 59% оценивается как 3 балла. При выполнении компьютерного теста не разрешается пользоваться какими бы то ни было печатными материалами, записями, непредусмотренными техническими средствами (мобильными телефонами, фотоаппаратурой и т.п.) или письменными принадлежностями.

Рис. 12. Инструкция для выходного тестирования

Примеры предьявляемых вопросов выходного тестирования представлены на рис. 13.

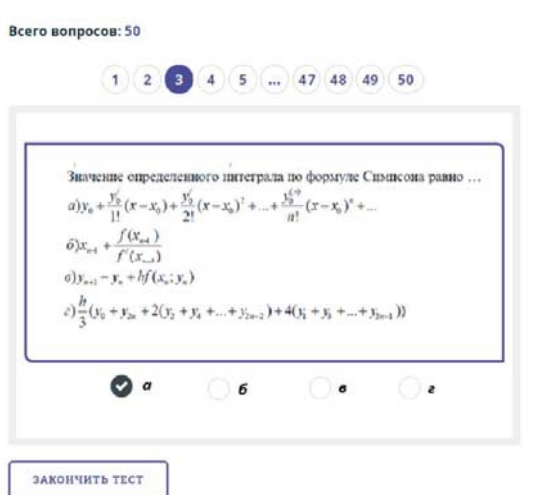


Рис. 13. Пример вопроса выходного тестирования

В результате прохождения выходного тестирования пользователь получает на экран результат и статистику, которая представлена на рисунке 14.

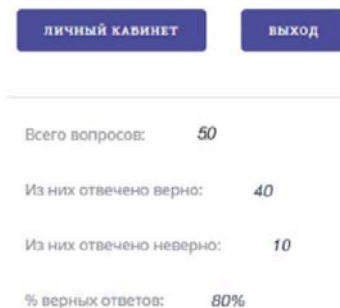


Рис. 14. Статистика результатов выходного тестирования

Эти результаты интегрируются в личный кабинет пользователя. Что дает возможность студенту проследить за своими успехами.

Журнал преподавателя

Для учета посещаемости и успеваемости студентов был разработан электронный журнал преподавателя, реализованный в виде таблицы, содержащей список студентов группы и даты проведения занятия. В журнал загружается список студентов группы преподавателем заранее, затем происходит синхронизация с существующими студентами, после их регистрации в системе.

Таблица построена с помощью аjax технологии. Предусмотрено добавление столбцов с датами преподавателем, которые генерируются динамически с помощью цикла.

На рисунке 15 представлен вариант заполнения таблицы учета посещаемости и успеваемости.



Журнал успеваемости

Ф.И.О.	Дата		
	03.05	07.05	17.05
Алиева А.В.	+	н	5
Бердасова С.А.	+	5	+
Бердасова Е.П.	+	5	+
Бердасова Е.А.	+	5	н
Жукова Е.А.	+	5	+
Жукова С.С.	+	5	+
Жукова Н.А.	+	н	5
Кутупова К.Т.	+	н	5
Мельникова А.А.	+	5	+
Мельникова Е.А.	+	5	н

Рис. 15. Пример журнала посещаемости и успеваемости



В таблице возможно введение любых значений и каждая ячейка, кроме первого столбца, ограничена длиной в 5 символов для корректного ввода данных.

Представленная информационная система позволит преподавателю автоматизировать процесс ведения журнала, иметь к нему удаленный доступ.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная информационная система для учебно-методической поддержки дисциплины «Численные методы линейной алгебры» позволяет студентам изучать теоретический материал, рассмотренный на лекции, также дает возможность заинтересованным студентам глубже изучать теоретический материал, получать индивидуальные задания для самостоятельного выполнения, проводить самоконтроль, отправлять выполненные задания преподавателю, задавать вопросы преподавателю, проходить выходное тестирование по дисциплине. Таким образом, разработанная информационная система позволяет улучшить качество усвоения учебного материала студентами.

Литература

1. *Куравский Л.С., Нуркаева И.М., Юрьев Г.А.* Дисциплина «Информатика и программирование»: программа, методические рекомендации и учебные пособия: Учебное пособие. – 2-е издание дополненное. – М.: ФГБОУ ВО МГППУ, 2017. – 102 с.
2. *Макфарланд Д.* Большая книга CSS3. – СПб.: Питер, 2016. – 720 с.
3. *Никсон Р.* Создаем динамические веб-сайты с помощью PHP, MySQL, JavaScript, CSS и HTML5. 3-е изд. – СПб.: Питер, 2015. – 688 с.
4. *Нуркаева И.М., Коморина К.А.* Информационная система диагностики профессионального выгорания педагогов // Моделирование и анализ данных. – М.: ФГБОУ ВО МГППУ, 2017. – № 1. – С. 95–103.
5. *Нуркаева И.М., Зайцев А.Н., Оглоблин А.А.* Информационная система для мониторинга учебных достижений студентов МГППУ // Моделирование и анализ данных. – М.: ФГБОУ ВО МГППУ, 2019. – № 1. – С. 30–41.



Information System for Educational and Methodological Support of the Discipline “Numerical Methods of Linear Algebra”

Nurkaeva I.M.*

MSUPE, Moscow, Russia,
e-mail: nurkaevaim@yandex.ru

Korchagina K.A.**

MSUPE, Moscow, Russia,
e-mail: vereinaka@mgppu.ru

The article deals with the development of an information system for educational and methodological support of the discipline of the mathematical cycle. The main requirements for the developed discipline are defined.

Keywords: Information system, self-control, testing, training, information technology, Internet.

References

1. Kuravskii L.S., Nurkaeva I.M., Yur'ev G.A. *Distsiplina «Informatika i programmirovaniye»: programma, metodicheskie rekomendatsii i uchebnye posobiya: Uchebnoe posobie. – 2-e izdanie dopolnennoe. – M.: FGBOU VO MGPPU, 2017. – 102 p.*
2. Makfarland D. *Bol'shaya kniga CSS3. – SPb.: Piter, 2016. – 720 p.*
3. Nikson R. *Sozdaem dinamicheskie veb-saity s pomoshch'yu PHP, MySQL, JavaScript, CSS i HTML5. 3-e izd. – SPb.: Piter, 2015. – 688 p.*
4. Nurkaeva I.M., Komorina K.A. *Informatsionnaya sistema diagnostiki professional'nogo vygoraniya pedagogov. Modelirovanie i analiz dannykh. – M.: FGBOU VO MGPPU, 2017. – № 1. – pp. 95–103.*
5. Nurkaeva I.M., Zaitsev A.N., Ogloblin A.A. *Informatsionnaya sistema dlya monitoringa uchebnykh dostizhenii studentov MGPPU. Modelirovanie i analiz dannykh. – M.: FGBOU VO MGPPU, 2019. – № 1. – pp. 30–41.*

For citation:

Nurkaeva I.M., Korchagina K.A. Information System for Educational and Methodological Support of the Discipline “Numerical Methods of Linear Algebra”. *Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis*, 2020. Vol. 10, no. 1, pp. 176–188. DOI: 10.17759/mda.2020100112 (In Russ., abstr. In Engl.)

***Nurkaeva Irina Mikhailovna**, candidate of pedagogics, docent of applied Informatics and multimedia technologies, Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russia, e-mail: nurkaevaim@yandex.ru

****Korchagina Kristina Alekseevna**, specialist in educational and methodological work of the IT faculty, Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russia, e-mail: vereinaka@mgppu.ru

◇◇◇◇◇◇◇◇ МЕТОДИКА ОБУЧЕНИЯ ◇◇◇◇◇◇◇◇

УДК 159.9, 004.4

Геймификация обучения на примере разрабатываемой видеоигры для изучения таблицы умножения «Умножай с лисой»

Жаркова О.Г.*

ГБОУ ВПО МГППУ, Москва, Россия,
e-mail: Olga.milk.13@yandex.ru

В статье приводятся обобщенные результаты выполнения выпускной квалификационной работы, связанной с обучением детей младшего школьного возраста таблице умножения в форме видеоигры, этот подход называется геймификацией. Объясняется отличие подхода геймификации обучения от традиционных, современных и игровых методик для изучения таблицы умножения, дается описание методик. Приведен краткий обзор возможностей видеоигры «Умножай с лисой». Приводятся результаты устного опроса на проверку знания таблицы умножения и тестирования разработанной видеоигры на детях дошкольного и младшего школьного возраста. Делается вывод о том, что данное приложение способно подойти не всем обучающимся и нацелено на определенную аудиторию – это, в основном, обладающие хорошим зрительным восприятием, уже использующие смартфоны для игр и других целей, дети, или стеснительные, или с синдромом дефицита внимания и гиперреактивности, или с рассеянным вниманием, не позволяющим долго заниматься одним видом деятельности без должного стимула. В ходе тестирования было выявлено, что обучающим приложением не могут пользоваться люди, которые медленно читают, плохо знают числа или имеют проблемы со зрением.

Ключевые слова: таблица умножения, геймификация, приложение, видеоигра, умножение, игры, изучение таблицы умножения, методики, подход, ученики, дети.

Для цитаты:

Жаркова О.Г. Геймификация обучения на примере разрабатываемой видеоигры для изучения таблицы умножения «Умножай с лисой» // Моделирование и анализ данных. 2020. Том 10. № 1. С. 189–197. DOI: 10.17759/mda.2020100113

**Жаркова Ольга Геннадьевна*, студент магистратуры, Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), Москва, Россия, e-mail: olga.milk.13@yandex.ru



1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение таблицы умножения у многих детей вызывает трудности. Большинство детей не готовы тратить время на выполнение домашних заданий и, тем более, дополнительных заданий. С развитием мультимедийных технологий, ситуация усугубилась еще и тем, что дети с раннего возраста стали приобретать зависимость от технических устройств. По данным исследования, проведенного компанией «Твиди» и Высшей Школой Экономики, 80 % опрошенных детей и подростков, в возрасте от 6 до 15 лет, активно используют гаджеты. Дети до 12 лет используют смартфоны и планшеты в основном для игр и просмотра видео [4].

Такое повальное увлечение гаджетами способствует изменению мышления детей. Дети выполняют несколько заданий одновременно, используют фоновый шум, смотрят видео, переписываются с друзьями и, при всем этом, выполняют задания, требующие концентрации внимания.

2. МЕТОДИКИ ИЗУЧЕНИЯ ТАБЛИЦЫ УМНОЖЕНИЯ

Традиционный подход изучения таблицы умножения

Чаще всего применяется и является основным. Рассчитан на ответственных детей или помощь родителей и учителей, для проверки результатов заучивания. В традиционном подходе изучения таблицы умножения выделяют 3 этапа:

1. Подготовительный – учащимся объясняются теоретические основы умножения и особые случаи умножения, такие как умножение на ноль, единицу и десятку.
2. составление таблиц – учащиеся составляют таблицы, опираясь на сложение и на действия с фигурами и предметами.,
3. запоминание таблиц – таблица умножения изучается в порядке возрастания чисел от 2 до 9. При изучении используется переместительное свойство множителей. Это свойство позволяет сократить заучивание таблицы умножения.

Успешность выполнения каждого этапа и возможность перехода на следующий оценивается учителем.

Современные методики для изучения таблицы умножения

Современные методики по изучению таблицы умножения признают необходимость использования разных подходов с учетом темперамента, характера, предрасположенностей, физической активности и склада ума. Правильно подобранный метод позволяет достичь желаемого результата в короткие сроки. Изучение может проходить в группе или индивидуально.

Активным детям предлагается игровой метод. В нем можно использовать карточки, картинки, счетные палочки, специальные программы, мультфильмы, игры с мячом, счет на пальцах и другое.

Творческим детям предлагают изображать таблицу умножения в ярких рисунках, петь песни, связанные с таблицей умножения, учить веселые математические четверостишия, например, Усачёва и Казариной.



По мнению Аргинской И.И. изучение умножения и деления является важнейшей частью всего курса математики второго класса. Изучение таблицы умножения начинается с объяснения связи умножения и сложения, связи деления и умножения, законов и свойств умножения и деления. По методике Аргинской, таблицы умножения и деления изучаются путем решения математических задач [1].

Изучение таблицы умножения по системе обучения Эльконина Д.Б.–Давыдова В.В. происходит в третьем классе. Последовательность изучения таблиц умножения: умножение 0 и 1 на любое число, а значит и на 10,100 и т.д., затем умножение 9-ки, 2-ки, 5-ки, 6-ки, 4-ки, 8-ки, 3-ки и 7-ки. Основным способом изучения таблицы умножения по этой методике является выявление закономерностей (секретов) и общих способов. Сама операция умножения описывается как особое математическое действие, связанное с переходом к новым меркам в процессе измерения величин [2; 3].

Изучение таблицы умножения с помощью видеоигр. К сожалению, большинство таких игр имеют скучный, сухой дизайн, который очень быстро надоедает детям. Игры, представленные на рынке, скорее, помогают проверить знание таблицы умножения и не дают новшеств в ее изучении.

Кроме перечисленных существует множество других методик для изучения таблицы умножения.

3. ГЕЙМИФИКАЦИЯ

Геймификация как термин, впервые был использован Ником Пеллингом (Nick Pelling), американским программистом и изобретателем, в 2002 г. Сегодня геймификация применяется во многих областях.

Геймификация (игрофикация) – это использование игровых элементов в неигровом контексте, то есть процесс, когда элементы игры используют для достижения реальных целей. Важно, что геймификация – это не создание полноценной игры, а только использование определенных элементов. За счет этого создается больше гибкости и большее соответствие желаемым целям [5].

4. ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕЙМИФИКАЦИИ ОБУЧЕНИЯ

С помощью геймификации изменяется способ организации обучения. При этом, в отличие от игровых практик, где принято играть разные роли, геймификация сохраняет роли и не изменяет характер деятельности. При изучении таблицы умножения каждый понимает, что изучает её и остается собой. Одна из отличительных черт геймификации заключается в том, что «реальность остается реальностью, не превращаясь в игру, а игровые установки вводятся в систему операций субъекта с этой реальностью.» [6].



Курс обучения строится таким образом, чтобы дать дополнительную мотивацию для выполнения образовательных заданий. Например, не просто решить 20 математических примеров, а набрать 40 баллов за решение математических примеров к заданному сроку для получения достижения «арифметик» и перехода на следующий уровень. Ввод достижений и уровней делает процесс обучения более захватывающим.

Одним из недостатков геймификации является смещение мотивации. Если интересы ученика основаны на внутренней мотивации подкреплять вознаграждениями, например, решение интересных примеров, то существует вероятность снижения собственного интереса ученика к этой области и снижение активности до минимального уровня, требуемого для получения вознаграждения.

Игровые и ролевые методики обучения кардинально отличаются от подхода геймификации. Ролевые игры переносят ученика в воображаемый мир, где каждому присвоена некая роль. Лекции преподносятся в игровой форме и доставляют удовольствие. Но часто ученики не осознают связи между знаниями, полученными во время ролевой игры и реальными знаниями.

Использование геймификации не заменяет всего процесса традиционного обучения. Ученикам необходимо посещать лекции, семинары и выполнять домашние задания. Геймификация дополняет процесс обучения, чтобы сделать его более увлекательным. Оценки могут быть заменены уровнями и достижениями. Сам процесс обучения остается в реальности.

Оценки, рейтинг, успеваемость – это всё скрытая геймификация, которая настолько укрепилась в системе образования, что воспринимается как что-то естественное. Даже контрольные работы и переход в следующий класс является аналогом битвы с боссом и некий переход на новый уровень.

Мнения ученых о пользе такого подхода противоречивы. Кто-то видит опасность в снижении мотивации и плохом усвоении новых знаний, другие восхваляют данный подход в связи с тем, что у учеников появляется дополнительная мотивация. Очевидно, что все дети индивидуальны, и к каждому нужен особый подход.

5. ОБЗОР ВИДЕОИГРЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТАБЛИЦЫ УМНОЖЕНИЯ

Видеоигра по изучению таблицы умножения «Умножай с лисой» относится к жанру бесконечного раннера с препятствиями. Раннер – это жанр игры, в котором персонаж непрерывно перемещается, управление осуществляется нажатием на сенсорный экран для прыжка или выполнения какого-либо действия.

Для перепрыгивания препятствий в разрабатываемом приложении, необходимо будет решить пример из таблицы умножения однозначных чисел за отведенное на это время, выбрав правильный ответ из 4 представленных. У игрока есть 5 жизней, т.е. 5 раз можно ошибиться за игровую сессию. Количество верно решенных и общее количество примеров отображается в правом верхнем углу экрана (Рис. 1).

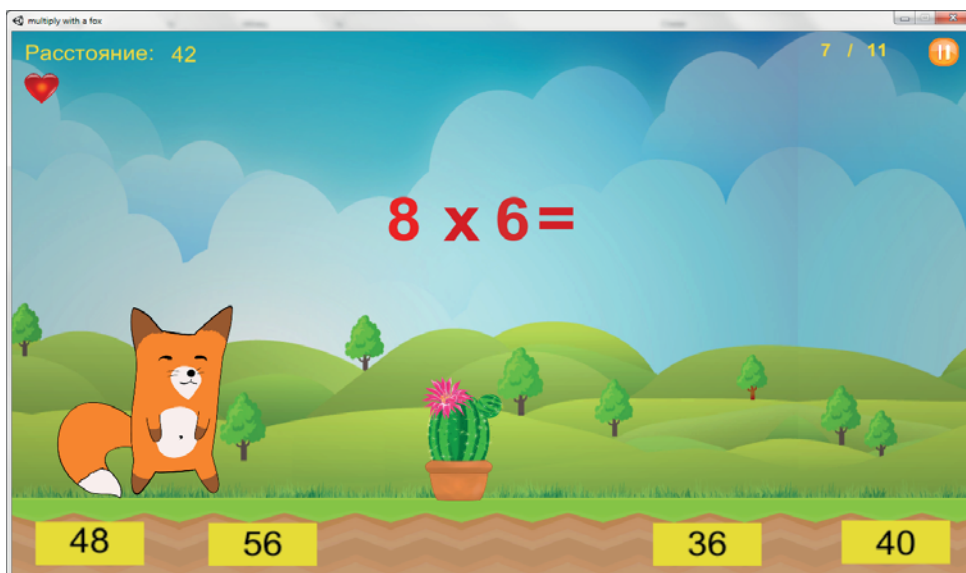


Рис. 1. Интерфейс игры «Умножай с лисой»

Если игрок не успевает выбрать ответ или вводит неверный, то персонаж не успевает перепрыгнуть препятствие, врезается в него и теряет одну жизнь. За пройденное расстояние начисляются очки. При потере всех жизней персонаж погибает. В конце игры выводится набранное количество очков и правильно решенных примеров.

Прогресс игрока записывается в базу данных. Прогресс можно посмотреть в профиле игрока в виде графика, даты игр и количества правильных и неправильных ответов. Для соревновательного интереса в игру добавлена таблица лидеров.

Запоминание происходит механически, так как на неудачу человеческий мозг реагирует острее. Сложность игры постепенно увеличивается, но если игрок не справляется с примерами, то происходит упрощение игры: скорость падает, примеры становятся проще. В данной игре можно схитрить, используя паузу, чтобы успеть посмотреть верный ответ, но даже так из-за возрастающей скорости игры придется запомнить ответ, чтобы успевать.

Существует 3 типа профилей пользователей:

- Ребенок: имеет доступ к игре для изучения таблицы умножения, профиль с прогрессом и достижениями.
- Учитель: имеет доступ к прогрессу учеников, может добавлять информацию о классах.
- Родитель: имеет доступ к прогрессу собственных детей.

Среда разработки: Unity 5. Данное приложение планируется выпустить на смартфоны под управлением Android, а затем и iOS.



6. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ВИДЕОИГРЫ «УМНОЖАЙ С ЛИСОЙ»

Тестирование проходило в одинаковых условиях для всех детей. Для тестирования был использован моноблок фирмы sony с сенсорным экраном. Тестирование состояло из двух этапов: устного опроса детей и решения примеров с помощью приложения.

Тестирование видеоигры проводилось с участием детей. Возраст детей варьируется от 6 до 11 лет. Игровая сессия была ограничена 15 примерами, после их решения игра завершалась, жизни не были ограничены. Результаты фиксировала вручную.

Дети проявили себя по-разному. Одни стеснялись, другие спешили поскорее попробовать новинку. Лучше всего в тестировании себя проявил Антон, 10 лет. Он оказался очень стеснительным, поэтому в устном тестировании он плохо показал свои знания таблицы умножения. Зато мобильная версия ему очень понравилась и в ней он смог улучшить свои результаты, после устного опроса. Его показатели улучшались в процессе игры. У Антона есть планшет и он играет во множество разнообразных игр.

Таблица результатов представлена ниже.

Таблица 1

Таблица результатов тестирования

Имя	Устный опрос			
	Попытка	верно	всего	скорость
Давид	1	15	15	очень быстро
	2	10	10	очень быстро
Дарина	1	1	4	медленно
Ксюша	1	12	15	быстро
	2	9	15	средне
	3			
	4			
	5			
Аня	1	9	15	средне
	2	12	15	средне
	3	11	15	быстро
Антон	1	7	15	медленно
	2	6	15	медленно

Тестирование тренажера			
верно	всего	скорость	вид
12	15	быстро	клавиатура
15	15	быстро	сенсор
0	6	не успевала	сенсор
7	15	средне	клавиатура
10	15	средне	сенсор
11	15	средне	сенсор
9	15	средне	клавиатура
13	15	средне	сенсор
10	15	медленно	сенсор
9	15	медленно	сенсор
7	15	быстро	сенсор
13	15	быстро	сенсор
3	6	не успевал	мышка
5	10	медленно	клавиатура
7	15	средне	сенсор
8	15	средне	сенсор
9	15	быстро	сенсор
12	15	быстро	сенсор
13	15	быстро	сенсор

В ходе тестирования было выявлено, что тренажером не могут пользоваться люди, которые медленно читают, плохо знают числа или имеют проблемы со зрением. Мобильная версия имеет преимущество перед компьютерной, т.к. сенсорный ввод гораздо удобнее, а выбор варианта ответа с помощью мыши может вызвать за-



труднения. С привыканием к приложению результаты улучшаются.

Видеоигра «Умножай с лисой» нацелена на определенную аудиторию – это, в основном, обладающие хорошим зрительным восприятием, уже использующие смартфоны для игр и других целей, дети, или стеснительные, или с синдромом дефицита внимания и гиперактивности, или с рассеянным вниманием, не позволяющим долго заниматься одним видом деятельности без должного стимула.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геймификация становится неотъемлемой частью современного мира. С малых лет люди становятся активными пользователями электронных устройств разного назначения. Они не любят монотонную деятельность, способны выполнять много задач одновременно, обладают плохой концентрацией, большой скоростью работы и им необходима обратная связь для понимания. Это меняет способ мышления современного поколения, а значит нужны новые подходы в образовании.

Видеоигра для смартфонов «Умножай с лисой» основывается на новых способностях и потребностях современного поколения детей. Тестирование игры показало, что найдутся дети, которым оно подойдет лучше, чем традиционные и современные методики изучения таблицы умножения.

Благодарности

Автор благодарит за помощь в поддержании рабочей атмосферы научного руководителя проекта к.ф.-м.н. Лукина В.Н.

Литература

1. *Аргинская И.И.* Математика: Учебник для 2 класса: В 2 частях / И.И. Аргинская, Е.И. Ивановская, С.Н. Кормишина. – Самара: Учебная литература издательский дом «Федоров», 2013 г.
2. *Система Д.Б. Эльконина – В.В. Давыдова* [Электронный ресурс] // школьная газета URL: <http://www.lbz.ru/gazeta/2019/15/15nomer.pdf> (Дата обращения: 14.01.2020)
3. *Валова Н.Н.* Уроки математики в системе развивающего обучения (Д.Б. Эльконина – В.В. Давыдова (3 класс)) [Электронный ресурс] // Эксперимент и инновации в школе. – 2008. – № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uroki-matematiki-v-sisteme-razvivayuschego-obucheniya-d-b-elkonina-v-v-davydova-3-klass> (дата обращения: 14.01.2020)
4. Описание исследования «Kids & gadgets» (VSMRB & Tvidi 2014) [Электронный ресурс] // совместный проект ВШЭ и компании «Твиди» URL: <https://www.slideshare.net/VSMRB/research-kids-gadgets-vsmrb-tvidi-2014> (Дата обращения: 23.03.2019)
5. *Дымова Т.Е.* Геймификация в образовании [Электронный ресурс] // статья на сайте корпорации «Российский учебник». – 2018. URL: <https://rosuchebnik.ru/material/gejmifikacija-v-obrazovanii/> (Дата обращения: 10.02.2020)
6. *Орлова О.В., Титова В.Н.* Геймификация как способ организации обучения // Вестник ТГПУ. 2015. № 9 (162). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geymifikatsiya-kak-sposob-organizatsii-obucheniya> (дата обращения: 14.02.2020).



Gamification of Training on the Example of a Video Game Being Developed to Study the Multiplication Table “Multiply with the fox”

Zharkova O.G.*

MSUPE, Moscow, Russia,

e-mail: Olga.milk.13@yandex.ru

The article summarizes the results of the final qualification work related to teaching children of primary school age the multiplication table in the form of a video game, this approach is called gamification. The difference between the teaching gamification approach and traditional, modern, and gaming methods for studying the multiplication table is explained, and a description of the methods is given. A brief overview of the features of the video game “Multiply with a fox”. The results of an oral survey to test the knowledge of the multiplication table and test the developed video games for children of preschool and primary school age are presented. It is concluded that this application is not suitable for all students and is aimed at a specific audience – these are mainly people with good visual perception, already using smartphones for games and other purposes, children who are shy, or with attention deficit disorder and hyperreactivity, or with distracted attention, not allowing for a long time to engage in one type of activity without the proper incentive. During testing, it was revealed that people who read slowly, have poor knowledge of numbers, or have vision problems cannot use the training application.

Keywords: multiplication table, gamification, application, video game, multiplication, game, learning multiplication table, technique, approach, child.

Acknowledgements

The author are grateful for his help in maintaining the working atmosphere Lukin V.N., the project supervisor.

References

1. Arginskaya I.I. Matematika: Uchebnik dlya 2 klassa: V 2 chastyah. I.I. Arginskaya, E.I. Ivanovskaya, S.N. Kormishina. – Samara: Uchebnaya literatura izdatel'skiy dom «Fedorov», 2013g.
2. Sistema D.B. El'konina – V.V. Davydova [Elektronnyj resurs]. Shkol'naya gazeta URL: <http://www.lbz.ru/gazeta/2019/15/15nomer.pdf> (Data obrashcheniya: 14.01.2020)
3. Valova N.N. Uroki matematiki v sisteme razvivayushchego obucheniya (D.B. El'konina – V.V. Davydova (3 klass)) [Elektronnyj resurs]. Eksperiment i innovacii v shkole. – 2008. – № 3.

For citation:

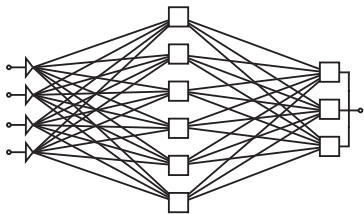
Zharkova O.G. Gamification of Training on the Example of a Video Game Being Developed to Study the Multiplication Table “Multiply with the fox”. *Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis*, 2020. Vol. 10, no. 1, pp. 189–197. DOI: 10.17759/mda.2020100113 (In Russ., abstr. In Engl.)

***Zharkova Olga Gennadievna**, student, Moscow state University of psychology and education, Moscow, Russia, e-mail: olga.milk.13@yandex.ru



URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uroki-matematiki-v-sisteme-razvivayuschego-obucheniya-d-b-elkonina-v-v-davydova-3-klass> (data obrashcheniya: 14.01.2020)

4. Opisanie issledovaniya “Kids & gadgets” (VSMRB & Tvidi 2014) [Elektronnyj resurs]. sovmestnyj proekt VSHE i kompanii «Tvidi» URL: <https://www.slideshare.net/VSMRB/research-kids-gadgets-vsmrb-tvidi-2014> (Data obrashcheniya: 23.03.2019)
5. Dymova T.E. Gejmifikaciya v obrazovanii [Elektronnyj resurs] // stat’ya na sajte korporacii «Rossijskij uchebnik». – 2018. URL: <https://rosuchebnik.ru/material/gejmifikacija-v-obrazovanii/> (Data obrashcheniya: 10.02.2020)
6. Orlova O.V., Titova V.N. Gejmifikaciya kak sposob organizacii obucheniya // Vestnik TGPU. 2015. № 9 (162). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geymifikatsiya-kak-sposob-organizatsii-obucheniya> (data obrashcheniya: 14.02.2020).



XVIII Всероссийская научная конференция «Нейрокомпьютеры и их применение»

17 марта 2020 года в здании МГППУ на Открытом шоссе, с соблюдением всех условий, предусмотренных в связи с эпидемией, была проведена XVIII Всероссийская научная конференция «Нейрокомпьютеры и их применение», посвященная актуальным проблемам применения нейронных сетей и других обучаемых структур в области естественных, технических и гуманитарных наук. Целью конференции является объединение специалистов, работающих в различных сферах применения нейросетевых алгоритмов и интеллектуальных информационных систем, обсуждение и обобщение опыта их теоретических и практических разработок, определение перспектив развития обучаемых структур. Большой интерес у участников вызвали пленарные доклады С.И. Попкова «Разработка программного тренажерного комплекса на основе прикладной многоагентной системы для обучения операторов сложных систем», С.А. Щаникова «Применение системного подхода при создании искусственных нейронных сетей на базе мемристоров», С.Д. Кулика «Особенности представления квалификационной работы, связанной с применением нейронных сетей» и А.В. Зайцева «О новой специальности “Робототехника военного и специального назначения”».

Ознакомиться с материалами конференции можно на сайте факультета информационных технологий МГППУ: <http://it.mgppu.ru/action/>.



*На фотографии: доктора наук, участвовавшие в работе секции
«Интеллектуальные информационные системы»*

Моделирование и анализ данных 2020. Том 10. № 1.

Научный журнал

Издаётся с 2011 года

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный психолого-педагогический университет»

Адрес редколлегии:

г. Москва, ул. Сретенка, 29, факультет информационных технологий

Тел.: +7 (499) 167-66-74

E-mail: mad.mgppu@gmail.com

Журнал зарегистрирован в Государственном комитете РФ по печати.

Свидетельство о регистрации средств массовой информации

ПИ № ФС77-52058 от 7 декабря 2012 года

ISSN: 2219-3758

ISSN: 2311-9454 (online)

Подписано в печать: 20.05.2020.

Формат: 70*90/16. Бумага офсетная.

Гарнитура Times. Печать цифровая.

Усл. печ. п. 12,4. Усл.-изд. л.11,2.

Тираж 500 экз.