

*Intellectual Technologies  
on Transport  
No 4*



*Интеллектуальные технологии  
на транспорте  
№ 4*

*Санкт-Петербург  
St. Petersburg  
2020*

**Интеллектуальные технологии на транспорте**  
**№ 4, 2020**

ISSN 2413-2527

Сетевой электронный научный журнал, свободно распространяемый через Интернет.  
Публикуются статьи на русском и английском языках с результатами исследований  
и практических достижений в области интеллектуальных технологий  
и сопутствующих им научных исследований.

Журнал основан в 2015 году.

---

**Учредитель и издатель**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

---

**Главный редактор**

Хомоненко А. Д., д.т.н., проф., С.-Петербург, РФ

**Сопредседатели редакционного совета**

Панычев А. Ю., ректор ПГУПС, С.-Петербург, РФ

Чаркин Е. И., директор по ИТ-технологиям ОАО «РЖД», Москва, РФ

---

**Редакционный совет**

Ададулов С. Е., проф., Москва, РФ  
Дудин А. Н., д.т.н., проф., БГУ, Минск, Беларусь  
Корниенко А. А., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ  
Ковалец П., проф., Техн. ун-т, Варшава, Польша  
Меркурьев Ю. А., проф., РТУ, Рига, Латвия  
Нестеров В. М., проф., СПбГУ, С.-Петербург, РФ

Пустарнаков В. Ф., ген. дир. «Газинформсервис»,  
С.-Петербург, РФ  
Титова Т. С., проф., проректор ПГУПС,  
С.-Петербург, РФ  
Федоров А. Р., ген. дир. «ДигДез», С.-Петербург, РФ  
Юсупов Р. М., проф., чл.-корр. РАН, С.-Петербург, РФ

---

**Редакционная коллегия**

Бубнов В. П., проф., С.-Петербург, РФ – зам. гл. ред.  
Александрова Е. Б., проф., С.-Петербург, РФ  
Атилла Элчи, проф., ун-т Аксарай, Турция  
Басыров А. Г., проф., С.-Петербург, РФ  
Безродный Б. Ф., проф., Москва, РФ  
Благовещенская Е. А., проф., С.-Петербург, РФ  
Булавский П. Е., д.т.н., доц., С.-Петербург, РФ  
Василенко М. Н., проф., С.-Петербург, РФ  
Глухов А. П., д.т.н., Москва, РФ  
Гуда А. Н., проф., Ростов-на-Дону, РФ  
Железняк В. К., проф., Новополоцк, Беларусь  
Заборовский В. С., проф., С.-Петербург, РФ  
Зегжда П. Д., проф., С.-Петербург, РФ  
Канаев А. К., проф., С.-Петербург, РФ  
Котенко А. Г., д.т.н., доц., С.-Петербург, РФ  
Куренков П. В., проф., Москва, РФ  
Лецкий Э. К., проф., Москва, РФ

Макаренко С. И., д.т.н., доц., С.-Петербург, РФ  
Мирзоев Т. А., асс. проф., Джорджия, США  
Наседкин О. А., к.т.н., доц., С.-Петербург, РФ  
Никитин А. Б., проф., С.-Петербург, РФ  
Новиков Е. А., д.т.н., доц., С.-Петербург, РФ  
Охтилев М. Ю., проф., С.-Петербург, РФ  
Привалов А. А., проф., С.-Петербург, РФ  
Соколов Б. В., проф., С.-Петербург, РФ  
Таранцев А. А., проф., С.-Петербург, РФ  
Утепбергенов И. Т., проф., Алматы, Казахстан  
Филипченко С. А., к.т.н., доц., Москва, РФ  
Фозилов Ш. Х., проф., Ташкент, Узбекистан  
Фу-Ниан Ху, проф., Цзянсу, Китай  
Хабаров В. И., проф., Новосибирск, РФ  
Ходаковский В. А., проф., С.-Петербург, РФ  
Чехонин К. А., проф., Хабаровск, РФ  
Ялышев Ю. И., проф., Екатеринбург, РФ

---

**Адрес редакции:**

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, ауд. 1–210  
e-mail: itt-pgups@yandex.ru

---

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций,  
свидетельство Эл № ФС77-61707 от 07 мая 2015 г.

Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

Периодичность выхода – 4 номера в год. Выпуски журнала доступны на сайте <http://itt-pgups.ru>.

Копии архивов с выпусками журнала проходят государственную регистрацию как электронное издание  
сетевого распространения в НТЦ "Информрегистр".

Информация предназначена для детей старше 12 лет.

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», 2020

# Intellectual Technologies on Transport

## Issue 4, 2020

ISSN 2413-2527

Network electronic scientific journal, open access. It publishes articles in Russian and English with the results of research and practical achievements in the field of intelligent technologies and associated research.

Founded in 2015.

---

### Founder and Publisher

Federal State Educational Institution of Higher Education  
«Emperor Alexander I Petersburg State Transport University»

---

### Editor-in-Chief

Khomonenko A. D., Dr. Sc., Prof., St. Petersburg, Russia

### Co-chairs of the Editorial Council

Panychev A. Yu., rector of PSTU, St. Petersburg, Russia

Charkin E. I., CIO of JSC "RZD", Moscow, Russia

---

### Editorial Council Members

Adadurov S. Ye., Prof., Moscow, Russia

Dudin A. N., Prof., BSU, Minsk, Belarus

Kornienko A. A., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Kovalets P., Prof., Tech. University, Warsaw, Poland

Merkuryev Y. A., Prof., RTU, Academician of the

Latvian Academy of Sciences, Riga, Latvia

Nesterov V. M., Prof., SPbSU, St. Petersburg, Russia

Pustarnakov V. F., CEO at «Gazinformservice» Ltd.,  
St. Petersburg, Russia

Titova T. S., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Fedorov A. R., CEO at «Digital Design» Ltd.,  
St. Petersburg, Russia

Yusupov R. M., Prof., Corr. Member of RAS,  
St. Petersburg, Russia

---

### Editorial Board Members

Bubnov V. P., Prof., St. Petersburg, Russia –  
Deputy Editor-in-Chief

Aleksandrova E. B., Prof., St. Petersburg, Russia

Atilla Elci, Prof., Aksaray University, Turkey

Basyrov A. G., Prof., St. Petersburg, Russia

Bezrodny B. F., Prof., Moscow, Russia

Blagoveshchenskaya E. A., Prof., St. Petersburg, Russia

Bulavsky P. E., Dr. Sc., As. Prof., St. Petersburg, Russia

Vasilenko M. N., Prof., St. Petersburg, Russia

Glukhov A. P., Dr. Sc., St. Petersburg, Russia

Guda A. N., Prof., Rostov-on-Don, Russia

Zheleznyak V. K., Prof., Novopolotsk, Belarus

Zaborovsky V. S., Prof., St. Petersburg, Russia

Zegzhda P. D., Prof., St. Petersburg, Russia

Kanaev A. K., Prof., St. Petersburg, Russia

Kotenko A. G., Dr. Sc., As. Prof., St. Petersburg, Russia

Kurenkov P. V., Prof., Moscow, Russia

Letzky E. C., Prof., Moscow, Russia

Makarenko S. I., Dr. Sc., As. Prof.,  
St. Petersburg, Russia

Mirzoev T. A., As. Prof., Georgia, USA

Nasedkin O. A., As. Prof., St. Petersburg, Russia

Nikitin A. B., Prof., St. Petersburg, Russia

Novikov Y. A., Dr. Sc., As. Prof., St. Petersburg, Russia

Ohtilev M. Y., Prof., St. Petersburg, Russia

Privalov A. A., Prof., St. Petersburg, Russia

Sokolov B. V., Prof., St. Petersburg, Russia

Tarantsev A. A., Prof., St. Petersburg, Russia

Utepbergenov I. T., Prof., Almaty, Kazakhstan

Filipchenko S. A., As. Prof., Moscow, Russia

Fozilov Sh. Kh., Prof., Tashkent, Uzbekistan

Fu-Nian Hu, Prof., Jiangsu, China

Khabarov V. I., Prof., Novosibirsk, Russia

Khodakovskiy V. A., Prof., St. Petersburg, Russia

Chekhonin K. A., Prof., Khabarovsk, Russia

Jalyshev Y. I., Prof., Ekaterinburg, Russia

---

### Editorial address:

190031, St. Petersburg, Moskovsky ave., 9, aud. 1–210

e-mail: [itt-pgups@yandex.ru](mailto:itt-pgups@yandex.ru)

---

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications and Mass Media,  
EL no. FS77-61707 testimony from May 7, 2015.

The journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI).

Frequency of release - 4 issues per year. Issues of the magazine are available at <http://itt-pgups.ru>.

Copies of the archives with the issues of the journal are state-registered as an electronic publication of network distribution  
in the Scientific and Technical Center "Informregister".

The content is for children over the age of 12.

## Содержание

*Черных А. К., Дергачёв А. И., Дергачёв С. А., Куранова О. Н.*  
Создание альтернативных решений по восстановлению железнодорожных объектов,  
разрушение которых прогнозируется в результате чрезвычайной ситуации (на англ.) ..... 5

*Самонов А. В.*  
Методика разработки интеллектуальных средств проектирования автоматизированных  
систем управления технологическими процессами ..... 10

*Байдыбеков А. А., Гильванов Р. Г., Молодкин И. А.*  
Современные фреймворки для разработки web-приложений ..... 23

*Воробьёв Е. Г., Воробьёва Д. Е.*  
Модернизация квантового протокола генерации ключей в целях устранения  
проблемы открытой части канала ..... 30

*Гарбарук В. В., Груздев Н. В.*  
Анализ однородности показателей ускоренных испытаний ..... 35

*Кiryushkin С. В.*  
Анализ моделей и новых подходов к оценке качества образования ..... 40

*Краткие сообщения*

*Ходаковский В. А., Лобов С. А.*  
Об одном способе подавления боковых лепестков функции автокорреляции ..... 46

*Доклады, представленные на международном семинаре  
«Модели и методы исследования информационных систем»  
на базе кафедр «Информационные и вычислительные системы»  
и «Высшая математика».  
Санкт-Петербург, Россия, 11–12 декабря 2020 г.*

*Ксенофонтова В. А.*  
Анализ применения нового способа перевозки нефтебитума для дорожно-строительных  
работ по железной дороге (на англ.) ..... 51

## Contents

*Chernykh A. K., Dergachev A. I., Dergachev S. A., Kuranova O. N.*  
Creation of Alternative Solutions for Recovery of Railway Objects in an Emergency  
Situation (in English) ..... 5

*Samonov A. V.*  
Methodology for Developing Intellectual Design Tools for Automated Process Control Systems ..... 10

*Baidybekov A. A., Gilvanov R. G., Molodkin I. A.*  
Modern Frameworks for Web Development ..... 23

*Vorobiev E. G., Vorobieva D. E.*  
Upgrading the Quantum Key-Generating Protocol to Eliminate the Problem of Open Semi-Ring ..... 30

*Garbaruk V. V., Gruzdev N. V.*  
Analysis of the Uniformity of Accelerated Testing Indicators ..... 35

*Kiryushkin S. V.*  
On the Issue of Assessing the Quality of Education ..... 40

*Short Messages*

*Khodakovsky V. A., Lobov S. A.*  
On One Method of Suppressing Lateral Sets of the Autocorrelation Function ..... 46

*Reports presented at the Models and Methods of Information Systems Research Workshop  
on the basis of the departments «Information and Computer Systems» and «Higher Mathematics».  
Saint Petersburg, Russian Federation, December 11–12, 2020.*

*Ksenofontova V. A.*  
Analysis of the Application of the New Bitumen Method for Railway Construction (in English) ..... 51

# Creation of Alternative Solutions for Recovery of Railway Objects in an Emergency Situation

PhD A. K. Chernykh

Saint Petersburg Military Order of Zhukov Institute  
of the National Guard Troops  
of the Russian Federation  
Saint Petersburg, Russia  
nataliachernykh@mail.ru

PhD A. I. Dergachev, PhD S. A. Dergachev,

PhD O. N. Kuranova

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University  
Saint Petersburg, Russia  
d\_ader@mail.ru, deburg@mail.ru, olga\_kuranova@mail.ru

**Abstract.** The technology of forming alternative solutions for the restoration of railway facilities, the destruction of which is predicted as a result of an emergency, using the mathematical apparatus of cluster analysis is proposed. The estimation of the dependence of the validity of this decision on the number of options for these alternative solutions using the mathematical apparatus of probability theory is proposed. The mathematical apparatus of analytical geometry used in the implementation of the proposed technology makes it possible to form a fairly simple scheme for choosing preferred solutions, in contrast to the more complex preference schemes used in decision theory and in the theory of artificial intelligence. The validity of the solution is defined as the degree of approximation of the developed solution to the optimal solution.

**Keywords:** emergency situation, decision to restore railway facilities, alternative solutions, validity of the decision, cluster analysis, probability theory.

## INTRODUCTION

We describe the technology of forming and clustering alternative solutions for the restoration of railway facilities, the destruction of which is predicted as a result of an emergency (in the following presentation – alternative solutions).

The organizational and technological decisions that should be made in the framework of restoring destroyed objects can be considered: the distribution of the resource of restoration materials between these objects; the choice of routes along which it is necessary to deliver restoration materials to them; the order of delivery of restoration materials to these objects, and others.

Note that as a result of an emergency, there may be restrictions on routes to destroyed objects, both in terms of their number and their capacity.

The possibility of forecasting alternative processes of restoration of destroyed objects based on the proposed universal approach will help to improve the efficiency of their restoration, and, therefore, in our opinion, gives relevance to this article.

Within the framework of the proposed technology, we will consider a conceptual scheme for forming alternative solutions for the restoration of destroyed objects.

Figure 1 shows a conceptual scheme for the formation of alternative solutions for the restoration of destroyed objects.

Note that all the blocks shown in figure 1 should be implemented in the form of a software shell for an automated workplace (APM) of an official who makes a decision to restore destroyed objects.

Let's give a conceptual description of the blocks shown in figure 1.

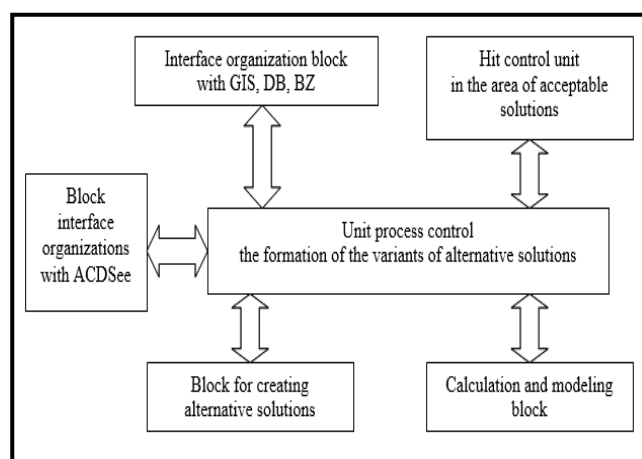


Fig. 1. Conceptual scheme for forming alternative solutions

In this scheme GIS — geographic information system, DB — database, BZ — knowledge base, ACDSec is a system for visualizing graphic documents.

Within the framework of the proposed technology, the main block is the control unit for the technological process of forming alternative solutions.

The specified unit shall be designed as a control procedure that implements the functions: the organization of production, control the admissibility and assessment of the effectiveness of the generated variants of alternative solutions; the organization interface with GIS, databases, knowledge bases and the application ACDSec (used for visualization of graphical information) in order to obtain the characteristics  $x_j$  ( $j = \overline{1, n}$ ) variants of alternative solutions (under characteristics will be to understand the parameters (inputs) to produce solutions and indicators (outputs) characterizing the solution) and formation of alternative solutions in the form of electronic maps of GIS applications.

The latter means that we will also understand the alternative solution as a map data.

In addition, the functions of the block are: saving an alternative solution for restoring a destroyed object in the form of an electronic map in the geoinformation system; displaying all the locations of one of the elements of alternative solutions on the current electronic map and then deleting unnecessary options for this element from the current electronic map; issuing the specified alternative solution option in the form of an electronic map on the display of the official making the decision to restore destroyed objects (LPR).

It is extremely important here that the use of the proposed technology of an automated information and calculation system included in the corresponding automated control system will allow you to visualize the dynamic components of the developed options for alternative solutions on the display devices of the relevant officials, as well as get a detailed display of the real situation in the framework of creating a simulacrum system (by simulacrum, we will understand software and hardware that create the impression of reality, displaying part of real phenomena and properties in a virtual environment).

Design and simulation block of the technology in question implements the formation of the basic version of the solution that is most probable for a given situation (algorithm and simulation calculations for the formation of a basic solution for transport network is given in e. g. [1]).

The control block for getting into the range of acceptable solutions is designed to implement the clustering problem [2] of alternative solutions.

SETTING AND SOLVING THE PROBLEM

The verbal statement of this problem is formulated as follows. Given a set of  $K$  objects (variants of alternative solutions)  $\phi (K = \{\phi\})$ , on this set there is a partition into a finite number of subsets (classes)  $K_i i = \overline{1, 2}, K = \bigcup_{i=1}^2 K_i$ , where  $K_1 (K_2)$  is the class of acceptable (invalid) solutions.

Objects  $\phi$  are defined by the values of some characteristics  $x_j, j = \overline{1, n}$  (this set is always the same for all objects). Each of the characteristics can take values from different sets of acceptable values —  $[a_j, b_j]$ , where  $a_j (b_j)$  is the minimum (maximum) acceptable value of  $x_j$ . You must distribute the generated  $\phi$  objects into two disjoint classes.

In [3], it is postulated that a unified algorithm for dividing objects into classes cannot be developed in principle. The proposed division is based on cluster analysis, which allows classifying objects depending on the compactness of their representations in the feature space, taking into account the a priori established measure of proximity — distance [4].

For the problem statement formulated in the article, classes  $K_1$  and  $K_2$  are separated by a hyperplane that has the form

$$\sum_{i=1, i \neq s}^n c_i \times x_i + c_s^0 x_s + d^0 = 0, \tag{1}$$

where  $x_s$  is the characteristic corresponding to the output variable «Directive deadline for completion of restoration work on a destroyed railway object», and its value  $t_v^{or}$  must set the point of orthogonal intersection of the  $0x_s$  axis with the plane (1), and also satisfy the equation

$$t_v^{or} = -\frac{d^0}{c_s^0}.$$

The specified plane divides the set of alternatives into two classes: the class of acceptable alternatives —  $K_1$ , located to the left of the hyperplane (1), and the class of invalid alternatives —  $K_2$ , located to the right of this hyperplane. The criterion for getting an alternative solution in class  $K_1$  is a positive value of the criterion indicator:

$$al(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\sum_{i=1, i \neq s}^n c_i \times x_i + c_s^0 (x_s - t_v^{or})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n c_i}}. \tag{2}$$

In order to translate the values  $x_1, x_2, \dots, x_n$  into a single measurement scale, we will normalize them in accordance with the formula

$$y_j = \frac{x_j - x_j^{min}}{x_j^{max} - x_j^{min}}, j = \overline{1, n},$$

where  $x_j$  and  $y_j$  are the non-normalized and normalized values of the  $j$ -th characteristic, the meter;  $x_j^{min}$  and  $x_j^{max}$  — minimum and maximum values of the  $j$ -th characteristic, meter.

Then it is simple enough to determine the nearest options for alternative solutions based on minimizing the distance between them. For example, you can use any of the following as the distances between two alternative solutions ( $V_k$  and  $V_m$ ):

– Hamming distance [5] —

$$\rho(V_k, V_m) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_j^{(k)} - y_j^{(m)}|;$$

– Euclidean distance —

$$\rho(V_k, V_m) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_j^{(k)} - y_j^{(m)})^2},$$

where  $y_j^{(k)}$  and  $y_j^{(m)}$  are normalized characteristics in the characteristic space, and essentially in the parameter space.

It should be noted that not all options for alternative solutions that fall into class  $K_2$  should be excluded from consideration some of them can be adjusted in one way or another, which we do not stop here, and introduced into class  $K_1$ .

Thus, it can be stated that the mathematical apparatus of analytical geometry used in the implementation of the proposed technology makes it possible to form a fairly simple scheme for choosing preferred solutions, in contrast to the more complex preference schemes used in decision theory and in the theory of artificial intelligence.

In this regard, we also note the ways of forming alternative solutions proposed in [6, 7].

We present an approach to determining the effectiveness of a decision to restore a railway facility, the destruction of which is predicted as a result of an emergency (hereinafter referred to as the decision), in terms of the validity of this decision.

We will determine the nature of the dependence of the validity of the developed solution on the number of alternative solutions developed by the LPR even before their implementation. The validity of the solution is defined as the degree of approximation of the developed solution to the optimal solution. Let's take a probabilistic approach to assessing this validity as a basis. It allows you to determine in a formalized form the dependence of the validity of the specified decision on the number of alternative solutions developed by the LPR. According to the proposed approach, the validity of a decision is defined as the probability of choosing the optimal solution —  $P$ .

Then the validity of the decision to restore railway facilities, the destruction of which is predicted as a result of an emergency, when considering  $m$  options for alternative solutions has the form

$$P_m = 1 - (1 - P_1)^m = 1 - e^{-\alpha \times \frac{tm}{t_1}}, \tag{3}$$

where  $t_1$  is the time spent by LPR to develop one alternative solution for the restoration of railway facilities, the destruction of which is predicted as a result of an emergency, hour;

$t_m$  — the total time allocated to develop a solution for the restoration of railway facilities, the destruction of which is predicted as a result of an emergency, and the LPR spent on developing  $m$  options for alternative solutions, hour;  
 $\alpha$  — equal to the expression  $\ln(1 - P_1)$ , number;  
 $P_1$  — the probability of choosing the optimal solution (in fractions of units) when considering one alternative solution, determined by the formula

$$P_1 = \frac{1}{m} \times P_{cd} = \frac{1}{m} \times \left(1 - e^{-\frac{\varepsilon}{\Delta}}\right)^n, \quad (4)$$

where  $P_{cd}$  — the probability of choosing a solution that deviates from the optimal one by an amount not exceeding  $\Delta$ , a fraction of units.

$\varepsilon$  — the maximum deviation of the control parameter from its optimal value, the meter;

$\Delta$  — the average square deviation of each control parameter from its optimal value, the number;

$n$  — is the number of optimized control parameters, the number.

Comment. Let's give some explanations on calculating the probability  $P_1$ :

– this formula is one of the terms of the total probability formula  $P_{pt} = \sum_{i=1}^m p_i^g p_i^p$ , in which  $p_i^g$  is the probability of the hypothesis — the choice of the optimal solution will be carried out when considering  $i$  options for alternative solutions,  $p_i^p$  is the probability of choosing the optimal solution when considering  $i$  options for alternative solutions;

– probability  $p_i^p$ , it is advisable to calculate by the formula  $\left(1 - e^{-\frac{\varepsilon_i}{\Delta_i}}\right)^n$ , and not by the formula  $\prod_{i=1}^n \left(1 - e^{-\frac{\varepsilon_i}{\Delta_i}}\right)$ , in which  $\varepsilon_i$  is the maximum deviation of the  $i$ -th control parameter from its optimal value, and  $\Delta_i$  is the average square deviation of the  $i$ -th control parameter from its optimal value, due to the need to expand the search area for the optimal solution as much as possible.

Calculations of the validity of the decision to restore railway facilities, the destruction of which is predicted as a result of an emergency when considering  $m$  options for alternative solutions show an increase in this indicator, which can be illustrated in figure 2.

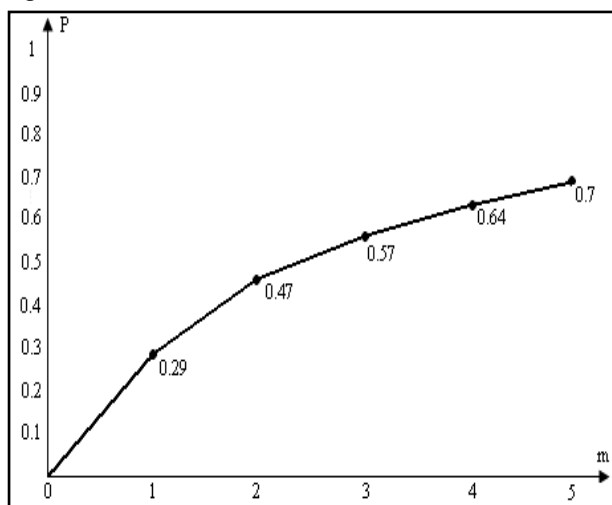


Fig. 2. Dynamics of the decision validity indicator

Note that the degree of increasing the validity of the decision can also be determined using the methods given in [8–10].

We emphasize that the fact of increasing the validity of the decision made with an increase in the number of developed (prepared and analyzed) LPR options for alternative solutions also indicates the relevance of the article.

#### CONCLUSION

As a conclusion, we note that in the article:

– the article considers the actual method of forming and clustering alternative solutions for improving the efficiency of solutions for the restoration of railway facilities, the destruction of which is predicted as a result of an emergency;

– an effective scheme for choosing preferred options for alternative solutions is proposed, in contrast to the more complex preference schemes used in the theory of artificial intelligence and in the theory of decision-making;

– given the approach to assessing the validity of decisions on the restoration of rail facilities, the destruction of which is projected by a disaster, based on which it is easy to develop a computer program, for example, means presented in [11].

#### REFERENCES

1. Maslakov, M. D. On the Assessment of the Term of the Execution of One Class of Complex of Works Connected to the Sets of Objects [Ob otsenke sroka vypolneniya odnogo klassa kompleksnykh rabot na svyaznykh mnozhestvakh ob"ektov na osnove matematicheskogo modelirovaniya] / M. D. Maslakov, A. K. Chernykh // Problems of Technosphere Risk Management [Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere]. 2014. No. 1 (29). Pp. 73–80.
2. Tyurin, Yu. N. Data analysis on a computer: Study guide [Analiz dannykh na kompyutere: Uchebnoe posobie] / Yu. N. Tyurin, A. A. Makarov. — Moscow: FORUM Publishing House, 2010. — 368 p.
3. Artificial Intelligence. Vol. 2. Models and methods: Reference book [Iskusstvennyy intellekt. Kniga 2. Modeli i metody: Spravochnik]. — Moscow: Radio and Communications, 1990. — 304 p.
4. Fuzzy sets in control and artificial intelligence models [Nechetkie mnozhestva v modelyakh upravleniya i iskusstvennogo intellekta] / A. N. Averkin, I. Z. Batyrshin, A. F. Blishun, [et. al.]. — Moscow: Nauka Publishers, 1986. — 312 p.
5. Blahut, R. E. Theory and practice of error control codes [Teoriya i praktika kodov, kontroliruyushchikh oshibki]. — Moscow: Mir Publishers, 1986. — 576 p.
6. Chernykh, A. K. Forecasting of Management of Transportations in The Conditions of the Emergency Situation of Regional Scale on Transport [Prognozirovanie upravleniya pervezokami v usloviyakh chrezvychaynoy situatsii regional'nogo masshtaba na transporte] / A. K. Chernykh, E. V. Kopkin, A. A. Skoptsov // Problems of Technosphere Risk Management [Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere]. 2015. No. 2 (34). Pp. 56–65.
7. Primakin, A. I. Application of Methods of Mathematical Modeling for Optimization of Distribution of Forces and Means of Police at Complication of an Operational Situation [Primenenie metodov matematicheskogo modelirovaniya dlya optimizatsii raspredeleniya sil i sredstv politzii pri oslozhnenii operativnoy obstanovki] / A. I. Primakin, A. K. Chernykh, N. A. Yakovleva // Vestnik of the St. Petersburg University of the

Ministry of Internal Affairs of Russia [Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta MVD Rossii]. 2015. No. 2 (66). Pp. 148–152.

8. Flegontov, A. V. On the Issue of Evaluating the Effectiveness of Organizational Systems Management Systems [K voprosu ob otsenke effektivnosti sistem upravleniya organizatsionnymi sistemami] / A. V. Flegontov, A. K. Chernykh, P. N. Klykov // Materials of the III Stability and Control Processes Conference in Memory of Prof. Vladimir Zubov [Ustoychivost' i protsessy upravleniya: Materialy III Mezhdunarodnoy konferentsii, posvyashchennoy 85-letiyu so dnya rozhdeniya professora V. I. Zubova] (St. Petersburg, Russia, October 05–09, 2015). — St. Petersburg: Fedorova G. V. Publishing House, 2015. — Pp. 555–556.

9. Artamonov, V. S. Approach to Assessing the Effectiveness of Management Systems of Organizational Systems Operating in Real-Time [Podkhod k otsenke effektivnosti sistem upravleniya organizatsionnymi sistemami, funktsioniruyushchimi

v real'nom masshtabe vremeni] / V. S. Artamonov, A. K. Chernykh, P. N. Klykov // Problems of Technosphere Risk Management [Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere]. 2014. No. 4 (32). Pp. 60–68.

10. Maslakov, M. D. About One Approach to Assessing the Effectiveness of Mathematical Models [Ob odnom podkhode k otsenke effektivnosti matematicheskikh modeley] / M. D. Maslakov, S. A. Bagretsov, A. K. Chernykh // Problems of Technosphere Risk Management [Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere]. 2013. No. 3 (27). Pp. 67–73.

11. Information systems and technologies. Information technology. Basic course: Textbook for universities. Part 1. [Informatsionnye sistemy i tekhnologii. Informatsionnye tekhnologii. Bazovyy kurs: Uchebnik dlya vuzov. Chast' 1] / A. V. Kostyuk, S. A. Bobonets, A. V. Flegontov, A. K. Chernykh. — St. Petersburg: Herzen State Pedagogical University of Russia, 2014. — 241 p.

# Создание альтернативных решений по восстановлению железнодорожных объектов, разрушение которых прогнозируется в результате чрезвычайной ситуации

к.т.н. А. К. Черных

Санкт-Петербургский военный ордена Жукова институт войск национальной гвардии Российской Федерации  
Санкт-Петербург, Россия  
nataliachernykh@mail.ru

к.воен.н. А. И. Дергачёв, к.э.н. С. А. Дергачёв,

к.т.н. О. Н. Куранова  
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I  
Санкт-Петербург, Россия  
d\_ader@mail.ru, debug@mail.ru, olga\_kuranova@mail.ru

**Аннотация.** Предложена технология формирования альтернативных решений восстановления железнодорожных объектов, разрушение которых прогнозируется в результате аварии, с использованием математического аппарата кластерного анализа. Предложена оценка зависимости обоснованности данного решения от количества вариантов этих альтернативных решений с использованием математического аппарата теории вероятностей. Математический аппарат аналитической геометрии, используемый при реализации предложенной технологии, позволяет сформировать достаточно простую схему выбора предпочтительных решений, в отличие от более сложных схем предпочтений, используемых в теории принятия решений и в теории искусственного интеллекта. Достоверность решения определяется как степень приближения разработанного решения к оптимальному решению.

**Ключевые слова:** чрезвычайная ситуация, решение о восстановлении объектов железнодорожного транспорта, альтернативные решения, обоснованность решения, кластерный анализ, теория вероятностей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Маслаков, М. Д. Об оценке срока выполнения одного класса комплексных работ на связанных множествах объектов на основе математического моделирования / М. Д. Маслаков, А. К. Черных // Проблемы управления рисками в техносфере. 2014, № 1 (29). С. 73–80.
2. Тюрин, Ю. Н. Анализ данных на компьютере: Учебное пособие по направлениям «Математика», «Прикладная математика» / Ю. Н. Тюрин, А. А. Макаров; Науч. ред. В. Э. Фигурнов. — 4-е изд., перераб. — Москва: Издательский Дом ФОРУМ, 2010. — 368 с. — (Высшее образование).
3. Искусственный интеллект: в 3 книгах. Кн. 2. Модели и методы: Справочник / Под ред. Д. А. Поспелова. — Москва: Радио и связь. Редакция литературы по информатике и вычислительной технике, 1990. — 304 с.
4. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А. Н. Аверкин, И. З. Батыршин, А. Ф. Блишун [и др.]; под ред. Д. А. Поспелова. — Москва: Наука, 1986. Главная редакция физико-математической литературы — 312 с. — (Проблемы искусственного интеллекта).

5. Блейхут, Р. Э. Теория и практика кодов, контролируемых ошибки = Theory and practice of error control codes / Пер. с англ. И. И. Грушко и В. М. Блиновского; под ред. К. Ш. Зигангирова. — Москва: Мир, 1986. — 576 с.

6. Черных, А. К. Прогнозирование управления перевозками в условиях чрезвычайной ситуации регионального масштаба на транспорте / А. К. Черных, Е. В. Копкин, А. А. Скопцов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2015. № 2 (34). С. 56–65.

7. Примакин, А. И. Применение методов математического моделирования для оптимизации распределения сил и средств полиции при осложнении оперативной обстановки / А. И. Примакин, А. К. Черных, Н. А. Яковлева // Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. 2015. № 2 (66). С. 148–152.

8. Флегонтов, А. В. К вопросу об оценке эффективности систем управления организационными системами / А. В. Флегонтов, А. К. Черных, П. Н. Клыков // Устойчивость и процессы управления: Материалы III Международной конференции, посвященной 85-летию со дня рождения профессора, чл.-корр. В. И. Зубова (Санкт-Петербург, 05–09 октября 2015 г.) / Под ред. А. П. Жабко, Л. А. Петросяна. — Санкт-Петербург: Издательский дом Федоровой Г. В., 2015. — С. 555–556.

9. Артамонов, В. С. Подход к оценке эффективности систем управления организационными системами, функционирующими в реальном масштабе времени / В. С. Артамонов, А. К. Черных, П. Н. Клыков // Проблемы управления рисками в техносфере. 2014. № 4 (32). С. 60–68.

10. Маслаков, М. Д. Об одном подходе к оценке эффективности математических моделей / М. Д. Маслаков, С. А. Багрецов, А. К. Черных // Проблемы управления рисками в техносфере. 2013. № 3 (27). С. 67–73.

11. Информационные системы и технологии. Информационные технологии. Базовый курс: Учебник для высших учебных заведений, ведущих подготовку по направлению 050100 «Педагогическое образование»: в 2 частях. Ч. 1 / А. В. Костюк, С. А. Бобонец, А. В. Флегонтов, А. К. Черных. — Санкт-Петербург: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2014. — 241 с.

# Методика разработки интеллектуальных средств проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами

к.т.н. А. В. Самонов

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского  
Санкт-Петербург, Россия  
a.samonov@mail.ru

**Аннотация.** Совершенствование технологий промышленной разработки автоматизированных систем управления организационно-технологическими процессами и техническими комплексами осуществляется в направлении создания и использования специализированных предметно-ориентированных языков и интеллектуальных средств поддержки процессов разработки систем определенного достаточно узкого класса и конкретной предметной области. Наиболее важными и сложными являются вопросы построения концептуальной модели предметной области и разработки адекватного и оптимального набора средств ее формального описания. В статье представлены методы и средства решения этих вопросов на основе задачно-ориентированной онтологии, архитектуры Захмана и средств проекта Eclipse Modeling Project. Применение разработанной методики и средств ее реализации позволит сократить сроки и повысить качество разрабатываемых систем.

**Ключевые слова:** автоматизированные системы управления, валидация и верификация, метамоделирование, предметно-ориентированные языки, DSM-решение, DSM-платформа.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из приоритетных задач долгосрочной программы развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года является разработка и внедрение на сети железных дорог Единой Интеллектуальной Системы Управления и автоматизации производственных процессов на Железнодорожном Транспорте (ИСУЖТ) [1]. Создание и применение ИСУЖТ позволит реализовать сквозные цифровые технологии организации перевозочного процесса («Цифровая железная дорога») на основе единого информационного пространства для организации и логистики грузовых и пассажирских перевозок, что должно привести к повышению эффективности использования инфраструктуры и качества железнодорожных перевозок. Для разработки систем такого масштаба и уровня сложности необходимо использовать технологии, методы и средства системной инженерии, основанной на формальных моделях и методах моделирования (Model-based systems engineering, MBSE). Наиболее известными системами, построенными на основе этих технологий, которые активно и успешно используются в авиационной и космической отрасли, автомобилестроении, железнодорожном транспорте, энергетике, в военно-промышленном ком-

плексе, являются: IBM Rational Rhapsody Developer [2], Sparx Enterprise Architect [3], MASIW [4].

Применение этих технологий на практике сдерживается как субъективными, так и объективными факторами, обусловленными их универсальностью и высокой сложностью освоения. Одним из направлений снижения влияния этих негативных факторов является создание специализированных предметно-ориентированных языков и средств инструментальной поддержки процессов создания систем определенного достаточно узкого класса и конкретной предметной области. Предметно-ориентированные языки более выразительны, понятны и удобны для применения различными категориями пользователей, поскольку оперируют привычной для них терминологией. Обеспеченные адекватными и апробированными методиками и рекомендациями, корректно внедренные в существующий или совершенствованный процесс разработки такие комплексы, получившие название DSM-решений (Domain Specific Modeling), существенно повышают эффективность и результативность работ по созданию сложных программно-технических систем. Примерами DSM-решений являются: AUTOSAR [5], SIGNAL V4 [6].

В настоящей статье представлено описание методики разработки DSM-решения, предназначенного для разработки программного обеспечения автоматизированных систем управления производственными процессами на железнодорожном транспорте (ПО АСУ ППЖТ) на основе технологий и средств проекта Eclipse Modeling Project (EMP). Последующие разделы статьи построены следующим образом. В первом разделе представлены результаты анализа современных методов и средств разработки DSM-решений, определены наиболее предпочтительные инструменты и порядок их применения для разработки DSM-решения, предназначенного для создания ПО АСУ ППЖТ. Во втором разделе представлены основные этапы методики разработки DSM-решения на основе технологий и средств проекта EMP. В третьем разделе дано описание спецификации концептуальной модели предметной области АСУ ППЖТ. В четвертом разделе представлен порядок разработки модели и грамматики предметно-ориентированного языка и инструментальных средств DSM-решения. В заключении отмечены отличительные

особенности рассмотренного в статье подхода к созданию DSM-решения, представлены основные достоинства и положительные эффекты его применения для разработки ПО АСУ ПЗЖТ.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАБОТ  
В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ЯЗЫКОВ  
И СРЕДСТВ ВИЗУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В англоязычных источниках предметно-ориентированные языки и средства работы с ними получили названия *Domain Specific Language (DSL)* и *DSL Tools* соответственно, а в комплексе со средой моделирования *Domain Specific Modeling* — DSM-решение. В области создания DSM-решений для визуального моделирования и проектирования сложных программно-технических систем в настоящее время активно работают научно-исследовательские институты, коммерческие и некоммерческие организации, отдельные коллективы исследователей и программистов. Полученные в ходе этих работ результаты используются в таких областях, как управление космическими комплексами и аппаратами, автомобильная промышленность, железнодорожный транспорт, робототехника, приборостроение, микроэлектроника, обеспечение информационной безопасности, медицина, здравоохранение и др. Как показал проведенный анализ, основным способом разработки DSM-решений является их генерация на базе некоторой более универсальной системы, которая называется DSM-платформой. В настоящее время наиболее функциональными и активно используемыми являются

следующие DSM-платформы: *MetaEdit* + [7], *MS DSL Tools* [8], *MPS (Meta Programming System)* [9], *Eclipse Modeling Project (EMP)* [10]. DSM-платформа позволяет специфицировать модель и грамматику предметно-ориентированного языка, задать внешний вид его графических элементов, сгенерировать по этим спецификациям визуальный редактор, генератор кода, верификатор и другие инструменты.

Стандартом де-факто в области разработки DSM-решений являются технологии, методы и средства, созданные в рамках проекта *EMP*. Наиболее активно используются следующие библиотеки, инструменты и языки: *EMF (Eclipse Modeling Framework)*, *GMF (Graphical Modeling Framework)*, *Xtext*, *QVT (Query-View-Transformation)*, *UML (Unified Modeling Language)*, *OCL (Object Constraint Language)*. Описание разработанных с помощью этих средств DSM-решений представлено в целом ряде научно-практических отчетов и статей [11–21]. Ниже представлен краткий обзор наиболее интересных из них.

В книге Ричарда Гронбэка (Richard C. Gronback) [11] дано описание состава и возможностей инструментов и средств EMP, необходимых для разработки DSM-решения. Предложен следующий порядок действий по созданию DSM-решения (рис. 1). На первом этапе разрабатывается концептуальная модель предметной области (ПрО), включающая описание основных сущностей модели (субъектов, объектов, операций, отношений между ними). Концептуальная модель разрабатывается в редакторе инструмента Xtext на EBNF-подобном языке.

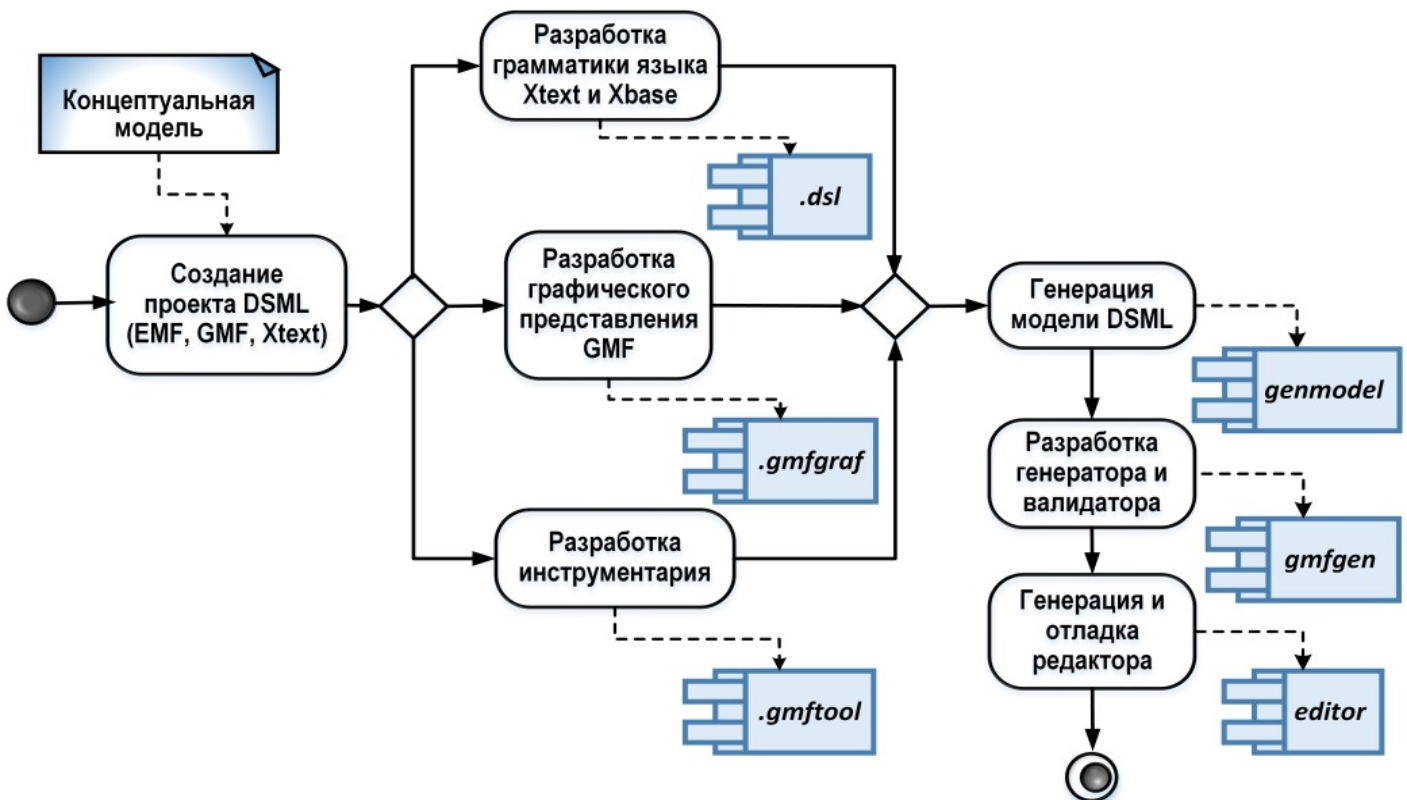


Рис. 1. Процесс разработки DSM-решения на базе DSM-платформы EMP

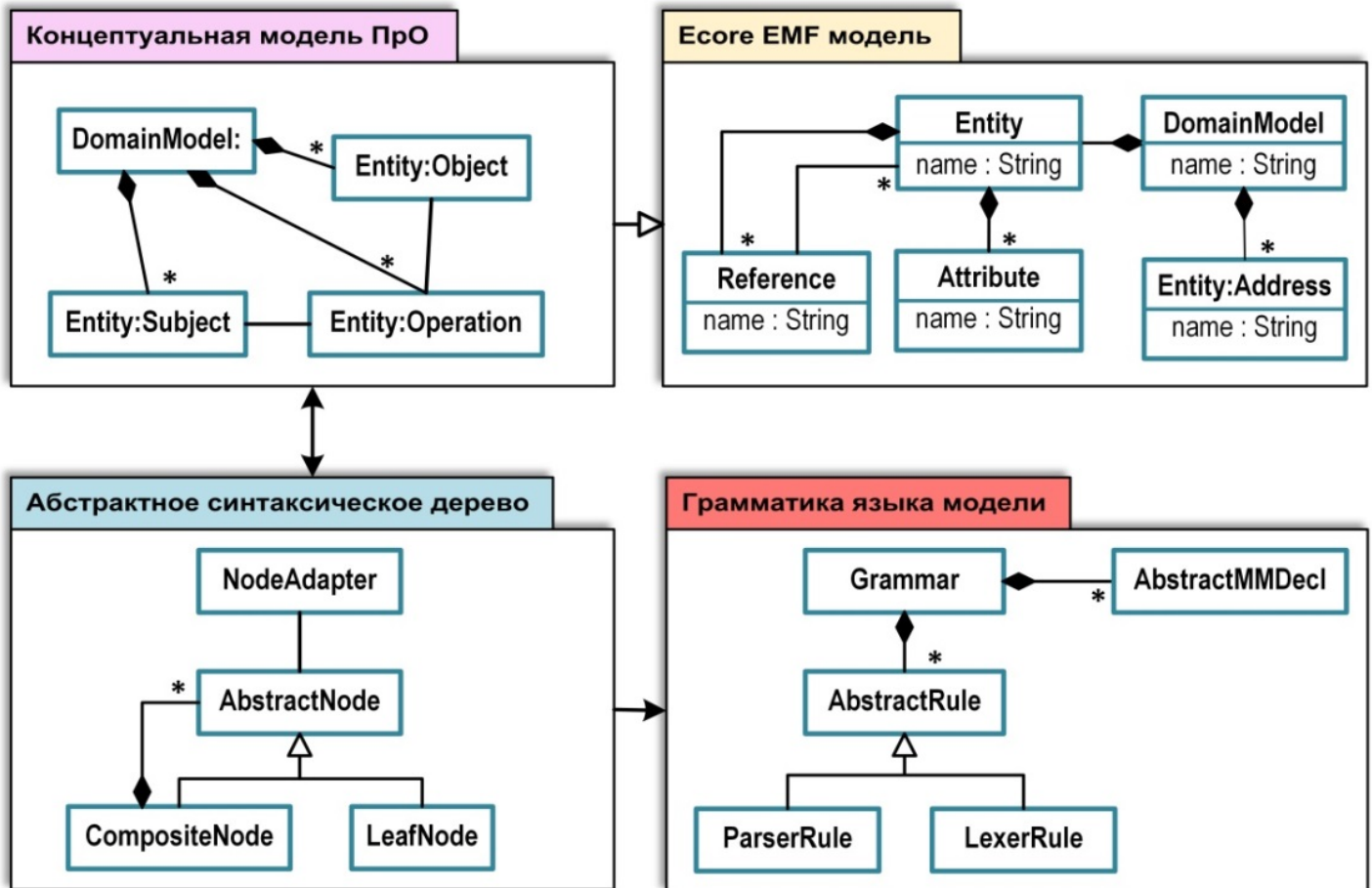


Рис. 2. Артефакты процесса разработки метамодели и грамматики языка DSM-решения

На ее основе с помощью средств фреймворка EMF и парсера ANTL создается метамодель в виде абстрактного синтаксического дерева (АСД), грамматика языка ПрО и редактор для разработки моделей на этом языке (рис. 2). Затем с помощью редактора и средств GMF определяются графические конструкции и символы для визуального описания моделей, определяется и генерируется набор инструментов для их использования и редактирования.

Процесс итеративен, все изменения, вносимые в метамодель, тут же применяются к модели. Если вносимое в метамодель изменение конфликтует с существующими моделями, выдается предупреждение. Процесс завершается созданием DSM-решения в составе текстового и графического редакторов, генератора кода и валидатора разрабатываемых с их помощью моделей и программ. Много полезной информации о практических результатах применения модельно-ориентированного подхода и предметно-ориентированных языков для создания сложных программно-технических систем можно найти на сайте Маркуса Фольтера (Markus Voelter). Одним из них является отчет [12], в котором обоснована целесообразность включения в состав DSM-решения компоненты, реализующей различного вида вычисления: арифметических и логических выражений, табличных и математических функций, списков, перечислений и доменных структур данных. Для разработки такого компонента в данной работе предлагается использовать

язык функционального программирования KernelF, который в дополнение к традиционным типам вычислений включает средства для обработки и верификации моделей поведения, описанных с помощью формализмов машины состояний, потоков данных, а также в терминах императивного и функционального программирования.

В работе [13] изложены фундаментальные языковые парадигмы DSL и описан процесс проектирования DSL для таких предметных областей, как здравоохранение и медицина, системы страхования, логистика, информационная безопасность. Для описания алгоритмов решения целевых задач, включая требования к характеристикам качества их реализации, предложены методы и средства представления, хранения и обработки математических и логических формул, таблиц и деревьев решений. В качестве инструментов были использованы: Xtext, MPS, mbeddr, Spoofox, Yakindu State Chart Tools. Приведены примеры применения этих средств для разработки программного обеспечения встраиваемых систем, которые должны соответствовать строгим требованиям безопасности, изложенным в стандартах безопасности ISO-26262, DO-178B, IEC-61508.

В статье [14] представлен пример разработки DSM-решения для создания программного обеспечения системы управления космическими аппаратами с помощью инструмента mbeddr. Данное DSM-решение обеспечивает интеграцию средств MPS (Meta Programming

System), на основе которого разработан mbeddr, с расширением языка программирования C, учитывающее специфику алгоритмов решения задач управления полетом и работой бортового оборудования космических аппаратов в соответствии со стандартами ECSS (*англ.* European Cooperation for Space Standardization — Европейская кооперация по стандартизации в области космической техники).

В статье [15] представлено описание того, как используются технологии и средства модельно-ориентированного подхода и предметно-ориентированных языков для реализации сложного и масштабного проекта по созданию Гигантского Магелланова телескопа (Giant Magellan Telescope, GMT) в обсерватории Лас-Кампанас в Чили, завершение строительства которого намечено на 2025 г. Данный проект включает работы по созданию целого комплекса систем: системы управления обсерваторией и ее инфраструктурой, системы управления телескопом, подсистемы управления многочисленными оптическими и электромеханическими устройствами. Для организации эффективного управления и обеспечения качественной реализации проекта GMT в соответствии с модельно-ориентированным подходом были разработаны эталонная архитектура всего проекта, набор предметно-ориентированных языков для описания входящих в него подсистем и устройств, фреймворк и набор базовых компонентов для разработки, интеграции и валидации программных комплексов и систем.

В статье [20] предлагается предметно-ориентированный подход к моделированию и валидации АСУ железнодорожным транспортом, сочетающий парадигму модельно-ориентированного подхода и формальный метод верификации моделей. Для разработки моделей используется предметно-ориентированный язык RailRoad DSL и инструмент Meeduse. Проверка корректности модели в отношении ее свойств безопасности и соответствия требованиям стандарта CENELEC EN 50128 осуществляется посредством формальной верификации методом В и валидацией с помощью симуляции.

Документ [21] содержит UML профиль для описания специфичных для систем управления железнодорожным транспортом объектов, процессов и состояний, включая средства представления маршрутов, датчиков, сигналов и примитивы для моделирования времени.

Большое количество публикаций об успешной реализации проектов по созданию сложных программно-технических комплексов и систем с помощью модельно-ориентированных технологий и DSM-решений убедительно свидетельствует о целесообразности применения данного подхода при разработке ПО АСУ ППЖТ. При разработке DSM-решения необходимо учитывать следующие рекомендации и факты:

– DSM-решение должно состоять из линейки продуктов, адекватно и корректно обеспечивающих поддержку всех этапов жизненного цикла систем: определение требований, проектирование, реализацию, испытания и сопровождение;

– для разработки DSM-решения целесообразно использовать технологии и средства, разрабатываемые в рамках проекта EMP;

– наиболее важными и сложными являются вопросы, связанные с определением и концептуализацией предметной области DSM-решения и выбором адекватного и оптимального набора средств и конструкций предметно-ориентированного языка.

В следующих разделах статьи представлено описание методики и средств разработки DSM-решения для проектирования ПО АСУ ППЖТ на основе технологий и средств проекта EMP.

#### ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ МЕТОДИКИ РАЗРАБОТКИ DSM-РЕШЕНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПО АСУ ППЖТ

DSM-решение, предназначенное для создания ПО АСУ ППЖТ, должно включать в свой состав базовую концептуальную модель предметной области, максимально полно и точно описывающую типовые процессы и сущности автоматизируемой управленческой деятельности, и комплекс информационных и программных средств, обеспечивающих программно-управляемый процесс разработки на ее основе автоматизированных систем управления конкретными объектами и средствами. Основными этапами процесса разработки DSM-решения, предназначенного для создания ПО АСУ ППЖТ являются (рис. 3):

– определение и разработка концептуальной модели предметной области АСУ ППЖТ;

– разработка на языке Eclipse Xtext грамматики предметно-ориентированного языка для описания процессов, событий и сущностей предметной области АСУ ППЖТ;

– построение модели языка DSM-решения в форме абстрактного семантического дерева (АСД);

– генерация модели языка с помощью EMF, Xtext и Xbase;

– разработка инструментальных средств DSM-решения: редактора, генератора кода, валидатора, среды исполнения и моделирования;

– разработка и адаптация графических компонентов и средств DSM-решения с помощью GMF.

На каждом из этих этапов осуществляется валидация и верификация созданных артефактов. В случае обнаружения дефектов, производится необходимая для их устранения доработка концептуальной модели, средств ее описания и использования.

Кроме стандартных текстовых и графических форм представления данных DSM-решение для создания ПО АСУ ППЖТ должно иметь в своем составе средства для описания, хранения, обработки и вычисления арифметических и логических выражений, табличных и математических функций и других специфических для предметной области структур и типов данных. Описание порядка и способов решения задач на основных этапах реализации данной методики представлено в следующих разделах статьи.

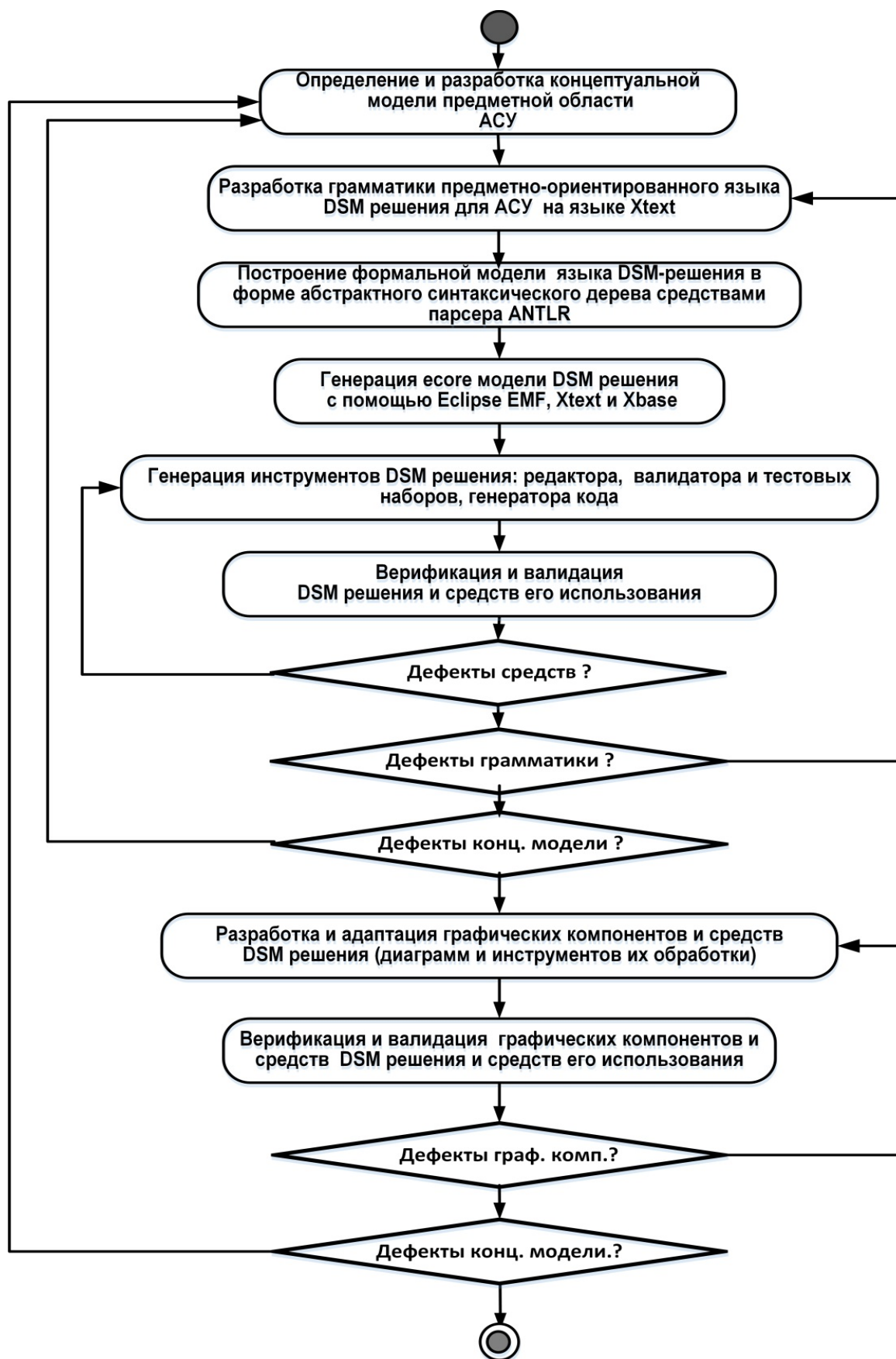


Рис. 3. Этапы методики разработки DSM-решения

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ  
ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ АСУ ППЖТ

АСУ ППЖТ функционирует в соответствии с определенным циклом управления, который является непрерывным и реализуется в соответствии с установленным порядком и правилами. Типовой цикл управления состоит из следующих функций: мониторинг и сбор информации о состоянии объекта управления (ОБУ), анализ состояния ОБУ, разработка решения о необходимости и способе воздействия на ОБУ, реализация управляющего воздействия в соответствии с принятым решением. Целью управления является поддержание управляемого объекта (ОБУ) в работоспособном состоянии, выполнение им определенных функций, достижение определенных результатов. В описании цели и функций управления должны быть включены требования к качеству решения целевых задач: оперативности, надежности, точности, защищенности и др. При разработке требований к функциональным возможностям и эксплуатационно-техническим характеристикам

АСУ ППЖТ целесообразно использовать модель качества систем, представленную в [22].

В качестве базового (корневого) понятия концептуальной модели предметной области целесообразно использовать «Функцию управления» (ФУ), атрибутами которой являются следующие сущности: цель (Ц), алгоритм (А), орган управления (ОрУ), объект управления (ОБУ), место (М), дата и время (Т). Таким образом, построенная в соответствии с моделью архитектуры Захмана концептуальная модель предметной области АСУ ППЖТ представляет собой иерархически организованную систему функций, атрибуты которых содержат ответы на следующие вопросы: кто является органом управления, кем (чем) управляет орган управления, с какой целью осуществляется управление, как осуществляется управление, когда и где реализуется данная функция. Состав и структура основных понятий концептуальной модели АСУ ППЖТ представлены на рисунке 4.

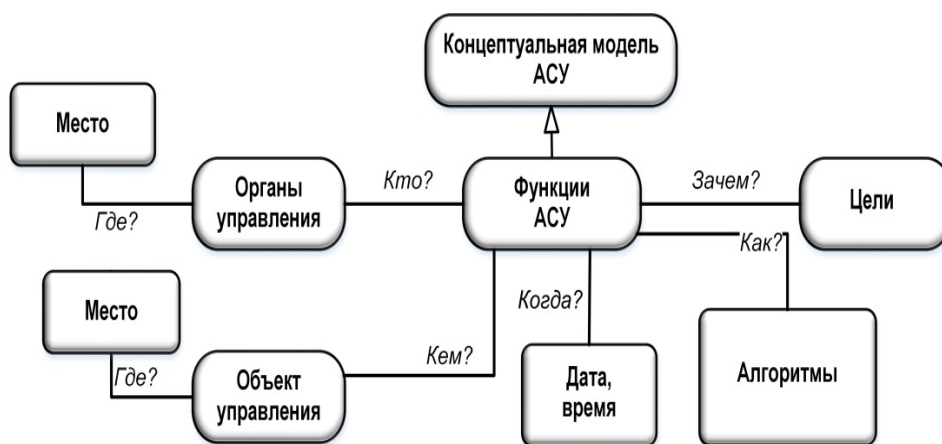


Рис. 4. Состав и структура концептуальной модели АСУ ППЖТ

Для описания каждого понятия концептуальной модели АСУ ППЖТ разрабатываются соответствующие ему шаблон на языке Xtext и графическая конструкция или символ средствами GMF. Каждая функция АСУ ППЖТ реализуется в соответствии с определенным алгоритмом. Для описания алгоритмов реализации функций могут использоваться табличные формы, деревья решений, диаграммы поведения. Форма и способ описания алгоритма зависят от характера и методов решения задачи.

Например, для описания алгоритмов решения информационно-расчетных задач целесообразно использовать диаграммы деятельности и деревья решений. Для алгоритмов, описывающих функционирование систем, управляемых внешними воздействиями, — диаграммы состояний и таблицы состояний. Для алгоритмов, описывающих функционирование систем, обменивающихся сообщениями и сигналами, — диаграммы последовательности и коммуникации.

Для реализации программно-управляемого процесса построения алгоритмов решения типовых задач управления в состав DSM-решения должны быть включены текстовые, табличные и графические шаблоны, а также соответствующий набор инструментов, обеспечивающий разработку диаграмм поведения, описание и обработку модельных данных, представленных в табличном и формульном виде, в форме арифметических и логических вы-

ражений. Для создания таких средств целесообразно использовать языки FUMML, OCL и KernelF. На рисунке 5 представлены состав и структура информационной составляющей DSM-решения, построенная на базе рассмотренной выше концептуальной модели.

Программные компоненты DSM-решения построены на основе инструментов проекта EMP (EMF, GEF, Xtext), используют базы данных с описаниями алгоритмов выполнения типовых функций управления (DB algorithms: monitoring, analysis, solution, realization), базы данных с описаниями характеристик ОрУ (DB Subjects) и ОБУ (DB Objects). Шаблоны для описания ОрУ и ОБУ включают следующие основные атрибуты и характеристики: название, назначение и решаемые задачи, состояние, месторасположение, вышестоящий орган, персонал, технические средства, комплексы средства автоматизации (КСА — S&W), системы и средства связи (ССС — Mean\_comm). Для описания и моделирования временных аспектов и ограничений процессов управления целесообразно использовать программный плагин Temporal OCL Plugin for Eclipse, в котором реализован математический аппарат логики ветвящегося времени — CTL (Computation Tree Logic) [23]. Грамматика языка для формального описания временных аспектов и ограничений процессов управления представлена на рисунке 6.

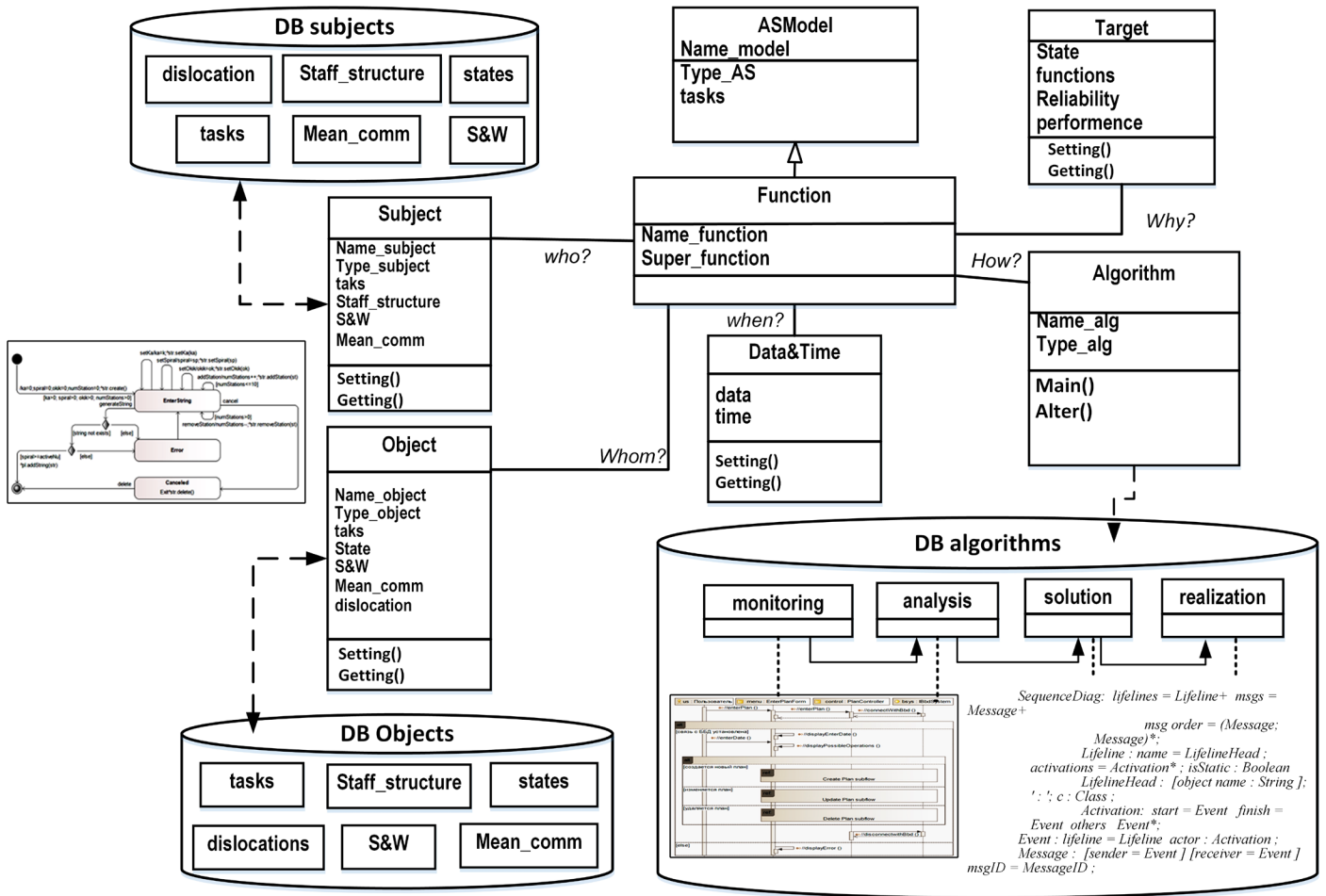


Рис. 5. Состав и структура информационной составляющей DSM-решения

```

TempOCL ::= temp (name)? ‘?’ TempSpec
TempSpec ::= Quantif? Parrent Scope
Quantif ::= let Variable (‘?’ Variable)* in
Pattern ::= always OclExpression
| never Event
| eventually Event ((at least | at most) ? integer times)?
| EventChain precedes (directly | strictly)? EventChain
| EventChain responds (directly | strictly)? EventChain
Scope ::= globally
| before Event (‘[’ | ‘]’)?
| after (‘[’ | ‘]’)? Event
| between (‘[’ | ‘]’)? last? Event and Event (‘[’ | ‘]’)?
| after (‘[’ | ‘]’)? last? Event until Event (‘[’ | ‘]’)?
| when OclExpression
Event ::= CallEvent (‘?’Event)?
| ChangeEvent (‘?’Event)?
EventChain ::= Event (‘?’Event)*
| Event (‘?’Event)*
CallEvent ::= isCalled (‘?’ (anyOp | op : Operation) (‘?’ pre : OclExpression) ?
(‘?’ post : OclExpression)? ‘?’
ChangeEvent ::= becomesTrue (‘?’ OclExpression ‘?’
    
```

Рис. 6. Грамматика языка для формального описания временных аспектов и ограничений процессов управления

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И ГРАММАТИКИ  
ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ЯЗЫКА  
И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ DSM-РЕШЕНИЯ

Модель и грамматика предметно-ориентированного языка для DSM-решения разрабатывается с помощью средств EMF, Xtext и Xbase на основе представленной на рисунке 5 расширенной концептуальной модели АСУ ППЖТ. Рисунок 7 иллюстрирует процесс разработки ASModel в среде Xtext.

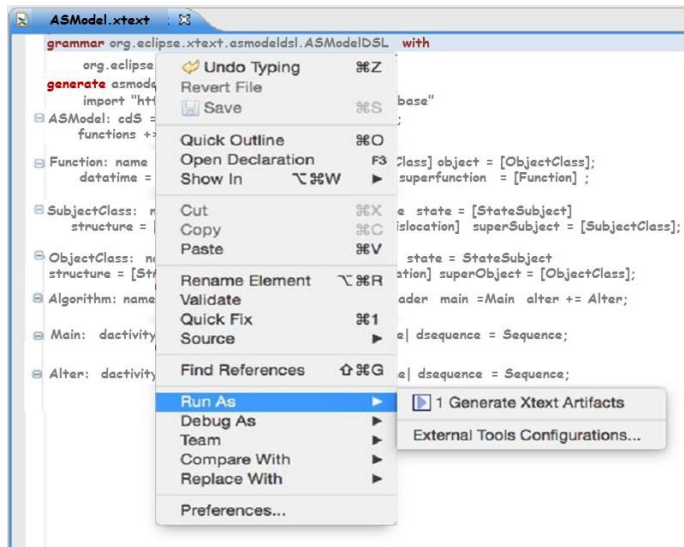


Рис. 7. Разработка ASModel в среде Xtext

Для описания каждого понятия концептуальной модели АСУ ППЖТ разрабатываются соответствующие ему шаблон на языке Xtext и графическая конструкция или символ средствами GMF. Каждая функция АСУ ППЖТ реализуется в соответствии с определенным алгоритмом.

В листинге 1 представлен фрагмент грамматики на языке средства Xtext, содержащий конструкции и правила для описания понятий верхнего уровня модели: функций, целей, алгоритмов, органов и объектов управления, времени и места. Три верхние строчки содержат команды-инструкции для Xtext: *grammar*, *generate* и *import*. Далее следуют правила грамматики, в левой части которых представлены нетерминальные символы, а в правой — их определение с помощью терминальных символов и нетерминальных выражений. Ключевое слово *with* в инструкции *grammar* указывает, что при генерации модели языка будет использована грамматика Xbase, которая, в свою очередь, базируется на абстрактном синтаксисе EMF Ecore. Благодаря этому создаваемая модель использует программно реализованные в Ecore модели классификаторы (*classifier*), классы (*class*), атрибуты (*attribute*), операции (*operation*), типы данных (*data type*), а также программные компоненты (*module*).

```

grammar org.eclipse.xtext.asmodeldsl.ASModelDSL with org.eclipse.xtext.xbase.Xbase
generate asmodel http://www.xtext.org/asmodeldsl
import "http://www.eclipse.org/xtext/xbase/Xbase"
ASModel: functions += Function + (cdS = SubjectsDiag) (cdO = ObjectsDiag);
Function: name = ControllID|ID subject = [SubjectClass] object = [ObjectClass];
        target = [Target] datetime = [DateTime] algorithm = [Algorithm] superfunction = [Function];
SubjectClass: name = SubjectClassID type = Type state = [StateSubject]
        structure = [StructureSubject] dislocation = [Dislocation]
        superSubject = [SubjectClass];
ObjectClass: name = ObjectClassID type = Type state = StateSubject
        structure = [StructureObject] dislocation = [Dislocation]
        superObject = [ObjectClass];
Algorithm: name = (AlgorithmID | ID) header = Header main = Main alter += Alter;
Main: dactivity = DActivity| dstate = StateMachine| dsequence = Sequence
Alter: dactivity = DActivity| dstate = StateMachine| dsequence = Sequence
DActivity: ActiveNode+ ActiveEdge+ Region*;
ActiveNode: ActiveInvocation | ActiveControl | ActiveObject
ActiveInvocation: ('условие: ' Guard*) activites += Active+;
Active: Action | Decision | Loop ;
SubjectsDiag: class_subject += SubjectClass + rel_subjects += RelationSubject +;
ObjectsDiag: class_object += ObjectClass + rel_Objects += RelationObject +;
RelationSubject: generalization | aggregation | composition | location | state;
RelationObject: generalization | aggregation | composition | location | state;
DateTime: data = Data time = Time;
    
```

Листинг 1. Фрагмент грамматики, содержащий конструкции для описания понятий верхнего уровня модели ПО АСУ ППЖТ

В представленном выше листинге 1 фрагмента грамматики языка для описания алгоритма используется диаграмма активностей (*DActivity*). В листинге 2 представлен фрагмент грамматики языка для описания

алгоритмов, описываемых посредством диаграммы последовательностей (*SequenceDiag*) и диаграммы состояний (*Statemachine*).

```
SequenceDiag: lifelines = Lifeline+ msgs = Message+
              msg order = (Message; Message)*;
Lifeline : name = LifelineHead; activations = Activation*; isStatic : Boolean
LifelineHead : [object name : String ]; ' : ' ; c : Class ;
Activation: start = Event finish = Event others Event*;
Event : lifeline = Lifeline actor : Activation ;
Message : [sender = Event ] [receiver = Event ] msgID = MessageID ;
          [sig = Signature ] [kind = MessageKind ];
          [sort = MessageSort ];
MessageID : [attr = Property ' = ']; name = String ;
           [ ( ; args = Argument* ; ` ) ]; [ ' : ' ; returnValue = Value ];
Argument ::= [paramName = String ; ` = ']; value = Value |
             attr = Property ; ' = ' ; outParamName = Parameter ;
             [ ' : ' ; value = Value ] | ' - ' ;
MessageKind : 'complete ' | 'lost ' | 'found ' | 'unknown ' ;
MessageSort : 'synchCall ' | 'asynchCall ' | 'asynchSignal ' |
              'createMessage ' | `deleteMessage ' | 'reply ' ;
Statemachine:
{Statemachine}
'events' (events+=Event)* 'end'
'resetEvents' (resetEvents+=[Event])* 'end'
'commands' (commands+=Command)* 'end'
(states+=State)*;
Event: name=ID code=ID;
Command: name=ID code=ID;
State: 'state' name=ID ('actions' '{ (actions+=[Command])+ }')?
      (transitions+=Transition)* 'end';
Transition: event=[Event] '=>' state=[State];
```

Листинг 2. Фрагмент грамматики языка для описания алгоритмов посредством диаграмм последовательностей и диаграмм состояний

В результате выполнения в редакторе EMF команды «l Generate Xtext Artefacts» («Генерировать Xtext артефакты») будут разработаны:

- модель и грамматика предметно-ориентированного языка;
- графические компоненты языка, а также средства их использования и редактирования;
- инструментальные средства DSM-решения: текстовый и графический редакторы, генератор кода, валидатор и верификатор построенных артефактов (комплекса требований, проектных решений, программной реализации).

Валидаторы и верификаторы DSM-платформы позволяют обнаруживать неполноту, некорректность, противоречивость и другие дефекты DSM-решения. В случае обнаружения дефектов средства DSM-платформы формируют и выдают соответствующие диагностические сообщения. Разработчик DSM-решения анализирует их, определяет источник и причину, производит доработку концептуальной модели и/или средств ее описания. В результате успешного завершения данного процесса создается первая версия требуемого DSM-решения, которая должна пройти

опытную эксплуатацию посредством разработки конкретных АСУ. По результатам опытной эксплуатации может быть проведена доработка DSM-решения для получения более адекватной и удобной версии.

Отличительными особенностями представленных в данной статье решений являются:

- структурно-информационная концептуальная схема DSM-решения, предназначенного для создания ПО АСУ ППЖТ, при разработке которой были использованы задачно-ориентированный онтологический подход проектирования концептуальных моделей и архитектурные шаблоны Захмана;
- грамматика текстового языка, графические конструкции и наборы шаблонов для формального описания сущностей предметной области и процессов автоматизируемой управленческой деятельности, построенные на основе языков и средств визуального моделирования UML, OCL, KernelF, EMF, Xtext, Xbase, GMF;
- детализированная методика разработки DSM-решения, предназначенного для создания ПО АСУ ППЖТ, построенная на основе структурно-информационной кон-

цептуальной схемы DSM-решения, использующая конструкции и средства формального описания сущностей и процессов автоматизируемой управленческой деятельности и обеспечивающая сквозной контроль качества разрабатываемых моделей и программных средств.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание DSM-решения, предназначенного для разработки ПО АСУ ППЖТ, должно начинаться с определения и разработки концептуальной модели предметной области, включая установление и описание участников и процессов управленческой деятельности, автоматизируемых функций, способов и условий их реализации. На основе этой информации определяются требования к составу и возможностям требуемого DSM-решения, осуществляется выбор наиболее адекватного из существующих. В случае отсутствия такого принимается решение о необходимости разработки нового, в полной мере удовлетворяющего заданным требованиям. Концептуальную модель предметной области целесообразно представить в виде иерархически упорядоченного набора функций управления, осуществляемых органами управления в отношении объектов управления для достижения установленных целей по определенным алгоритмам в соответствии с заданными временными, ресурсными и другими ограничениями. DSM-решение для разработки ПО АСУ ППЖТ должно обладать следующими возможностями:

- обеспечивать информационную и программную поддержку процессов разработки требований, проектных решений и программной реализации;

- иметь средства построения, моделирования и верификации структурных и поведенческих аспектов и свойств модели функционирования АСУ ППЖТ;

- хранить, представлять и обрабатывать данные, представленные в текстовом, графическом, табличном виде, в форме математических и логических выражений, структур данных, специфичных для предметной области АСУ ППЖТ.

Применение DSM-решений имеет следующие преимущества перед использованием универсальных средств разработки:

- благодаря использованию специализированных инструментальных средств анализа, проектирования и разработки, максимально полно и точно учитывающих особенности предметной области, обеспечивается более согласованное взаимодействие и взаимопонимание всех участников процесса и достигается более точное соответствие возможностей систем ожиданиям и потребностям конечного пользователя;

- полученные в результате формальные модели требований и проектных решений проходят строгие процедуры валидации и верификации, что позволяет обеспечить корректную автоматизированную генерацию и тестирование программного кода;

- обеспечивается сквозной контроль качества всех артефактов жизненного цикла системы, включая этап эксплуатации и сопровождения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Об утверждении долгосрочной программы развития открытого акционерного общества «Российские железные

дороги» до 2025 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 19.03.2019 № 466-р.

URL: <http://docs.cntd.ru/document/553927831> (дата обращения: 28.10.2020).

2. IBM Engineering Systems Design Rhapsody — Developer // IBM — Российская Федерация.

URL: <http://www.ibm.com/ru-ru/marketplace/uml-tools> (дата обращения: 20.10.2020).

3. Enterprise Architect. Full Lifecycle Modeling for Business, Software and Systems // Sparx Systems.

URL: <http://sparxsystems.com/products/ea> (дата обращения: 21.10.2020).

4. Инструментальные средства проектирования систем интегрированной модульной авионики / Д. В. Буздалов, С. В. Зеленов, Е. В. Корныхин [и др.] // Труды Института системного программирования РАН. 2014. Т. 26, № 1. С. 201–230. DOI: 10.15514/ISPRAS-2014-26(1)-6.

5. AUTOSAR. Enabling Innovation.

URL: <http://www.autosar.org/about> (дата обращения: 19.09.2020).

6. Besnard, L. SIGNAL V4 – INRIA version: Reference Manual (revised working version) — 01.04.2020 / L. Besnard, T. Gautier, P. Le Guernic. — 260 p.

URL: [http://polychrony.inria.fr/document/V4\\_def.pdf](http://polychrony.inria.fr/document/V4_def.pdf) (дата обращения: 21.10.2020).

7. MetaEdit+ Domain — Specific Modeling Tools, *Meta-Case*. URL: <http://www.metacase.com/products.html> (дата обращения: 21.10.2020).

8. Partlow, J., et al. Analyze and Model Your Architecture. — 11.04.2016 // Visual Studio / Microsoft Doc.

URL: <http://docs.microsoft.com/en-us/visualstudio/modeling> (дата обращения: 21.10.2020).

9. MetaCase. URL: <http://www.metacase.com/> (дата обращения: 21.10.2020).

10. Eclipse Modeling Project // The Eclipse Foundation. URL: <http://www.eclipse.org/modeling> (дата обращения: 21.10.2020).

11. Gronback, R. C. Eclipse Modeling Project: A Domain-Specific Language (DSL) Toolkit. First Edition. — Stoughton (MA): Addison-Wesley Professional, 2009. — 736 p.

12. Voelter, M. The Design, Evolution, and Use of KernelF: An Extensible and Embeddable Functional Language // Theory and Practice of Model Transformation: Proceedings of 11th International Conference on Theory and Practice of Model Transformations (ICMT 2018) (Toulouse, France, 25–26 June 2018) / A. Rensink, J. S. Cuadrado (eds) // Lecture Notes in Computer Science. 2018. Vol. 10888. — Pp. 3–55. DOI: 10.1007/978-3-319-93317-7\_1.

URL: <http://voelter.de/data/pub/kernelf-icmt.pdf> (дата обращения: 18.09.2020).

13. DSL Engineering: Designing, Implementing and Using Domain-Specific Languages / M. Voelter, S. Benz, C. Dietrich, [et al.]. — CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. — 558 p.

14. Wortmann, A. Domain Specific Languages for Efficient Satellite Control Software Development / A. Wortmann, M. Beet. Published at 2016. 8 p.

URL: [http://mbeddr.com/files/dasia\\_wortmann.pdf](http://mbeddr.com/files/dasia_wortmann.pdf) (дата обращения: 23.05.2020).

15. End-To-End Observatory Software Modeling Using Domain Specific Languages / J. M. Filgueira, M. Bec, N. Liu,

[et al.] // Software and Cyberinfrastructure for Astronomy III: Proceedings of the SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Conference (Montreal, Canada, 22–27 June 2014) / G. Chiozzi, N. M. Radziwill (eds) // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2014. Vol. 9152. — 13 p. Published online at 18 July 2014.

DOI: 10.1117/12.2056718.

URL: [http://www.gmto.org/SPIE\\_2014/2014-SPIE-9152-58.pdf](http://www.gmto.org/SPIE_2014/2014-SPIE-9152-58.pdf) (дата обращения: 22.07.2020).

16. EMF-IncQuery: An Integrated Development Environment for Live Model Queries / Z. Ujhelyi, B. Izsó, Z. Szatmári, [et al.] // Science of Computer Programming. 2015. Vol. 98, Pt. 1. Pp. 80–99.

DOI: 10.1016/j.scico.2014.01.004.

URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167642314000082> (дата обращения: 18.06.2020).

17. Belghiat, A. A Graph Transformation of Activity Diagrams into Pi-calculus for Verification Purpose / A. Belghiat, A. Chaoui // Proceedings of the Third International Conference on Advanced Aspects of Software Engineering (ICAASE 2018) (Constantine, Algeria, 01–02 December 2018). CEUR Workshop Proceedings. 2018. Vol. 2326. Pp. 107–114.

URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2326/paper14.pdf> (дата обращения: 18.08.2020).

18. Paige, R. F. A Tutorial on Metamodelling for Grammar Researchers / R. F. Paige, D. S. Kolovos, F. A. C. Polack // Science of Computer Programming. 2014. Vol. 96, Pt. 4. Pp. 396–416. DOI: 10.1016/j.scico.2014.05.007.

19. Mooij, A. Creating a Domain Specific Language (DSL) with Xtext. V10.0, 2019-10-14 — Eclipse IDE 2020-09 & Xtext 2.23 / A. Mooij, J. Hooman. — Nijmegen: Radboud University Nijmegen, 2020. — 37 p.

URL: [http://www.cs.ru.nl/J.Hooman/DSL/Creating\\_a\\_Domain\\_Specific\\_Language\\_\(DSL\)\\_with\\_Xtext.pdf](http://www.cs.ru.nl/J.Hooman/DSL/Creating_a_Domain_Specific_Language_(DSL)_with_Xtext.pdf) (дата обращения: 21.10.2020).

Specific\_Language\_(DSL)\_with\_Xtext.pdf (дата обращения: 21.10.2020).

20. Towards a Tool-Based Domain Specific Approach for Railway Systems Modeling and Validation / A. Idani, Y. Ledru, A. A. Wakrime, [et al.] // Reliability, Safety, and Security of Railway Systems. Modelling, Analysis, Verification, and Certification: Proceedings of Third International Conference on Reliability, Safety, and Security of Railway Systems (RSSRail 2019) (Lille, France, 04–06 June 2019) / S. Collart-Dutilleul, T. Lecomte, et al. (eds) // Lecture Notes in Computer Science. 2019, Vol. 11495. — Pp. 23–40.

DOI: 10.1007/978-3-030-18744-6\_2.

URL: [http://vasco.imag.fr/tools/meeduse/papers/RSSRail\\_Idani\\_Chapter\\_Author.pdf](http://vasco.imag.fr/tools/meeduse/papers/RSSRail_Idani_Chapter_Author.pdf) (дата обращения: 28.10.2020).

21. Berkenkötter K. The Railway Control System Domain. Draft Version / K. Berkenkötter, U. Hannemann, J. Peleska. — Bremen, 2006. URL: <http://www.informatik.uni-bremen.de/agbs/research/RCSD/RCSDprofile.pdf> (дата обращения: 18.08.2020).

22. Самонов, А. В. Методы и средства разработки автоматизированных информационных систем на основе онтологии «Управление качеством программно-технических комплексов» // Труды Института системного программирования РАН. 2019. Т. 31, Вып. 5. С. 165–182. DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(5)-13.

23. Kanso, B. Specification of Temporal Properties with OCL / B. Kanso, S. Taha // Science of Computer Programming. 2014. Vol. 96, Pt. 4. Pp. 527–551.

DOI: 10.1016/j.scico.2014.02.029.

URL: [http://www.researchgate.net/publication/260756267\\_Specification\\_of\\_temporal\\_properties\\_with\\_OCL](http://www.researchgate.net/publication/260756267_Specification_of_temporal_properties_with_OCL) (дата обращения: 18.07.2020).

# Methodology for Developing Intellectual Design Tools for Automated Process Control Systems

PhD A. V. Samonov

A. F. Mozhaisky Military Space Academy  
Saint Petersburg, Russia  
a.samonov@mail.ru

**Abstract.** Improving technologies for industrial development of automated systems for managing organizational and technological processes and technical complexes is carried out in the direction of creating and using domain-specific languages and intellectual means to support the development of systems of a certain rather narrow class and a specific subject area. The most important and complex issues are the construction of a conceptual model of the subject area and the development of an adequate and optimal set of tools for its formal description. The article presents methods and tools for solving these issues based on the task-oriented ontology, Zachman architecture, and tools of the Eclipse Modeling Project. Application of the developed methodology and means of its implementation will reduce the time and improve the quality of developed automated systems for special purposes.

**Keywords:** automated control systems, validation and verification, metamodeling, domain-specific languages, DSM-solution, DSM-platform.

## REFERENCES

1. On Approval of the Long-Term Development Program of the «Russian Railways» JSC until 2025: Order of the Government of the Russian Federation [Ob utverzhenii dolgosrochnoy programmy razvitiya otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Rossiyskie zheleznye dorogi» do 2025 goda: rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii] from March 19, 2019 No. 466-r. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/553927831> (accessed 28 Oct 2020).
2. IBM Engineering Systems Design Rhapsody — Developer, IBM — Russian Federation [IBM — Rossiyskaya Federatsiya]. Available at: <http://www.ibm.com/ru-ru/marketplace/uml-tools> (accessed 20 Oct 2020).
3. Enterprise Architect. Full Lifecycle Modeling for Business, Software and Systems, Sparx Systems. Available at: <http://sparxsystems.com/products/ea> (accessed 21 Oct 2020).
4. Buzdalov D. V., Zelenov S. V., Kornyxin E.V., et al. Tools for System Design of Integrated Modular Avionics [Instrumental'nye sredstva proektirovaniya sistem integrirovannoy modul'noy avioniki], *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS [Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN]*, 2014, Vol. 26, Is. 1, Pp. 201–230. DOI: 10.15514/ISPRAS-2014-26(1)-6.
5. AUTOSAR. Enabling Innovation. Available at: <http://www.autosar.org/about> (accessed 19 Sep 2020).
6. Besnard L., Gautier T., Le Guemic P. SIGNAL V4 — INRIA version: Reference Manual (revised working version) — 260 p. Available at: [http://polychrony.inria.fr/document/V4\\_def.pdf](http://polychrony.inria.fr/document/V4_def.pdf) (accessed 21 Oct 2020).
7. MetaEdit+ Domain — Specific Modeling Tools, *Meta-Case*. Available at: <http://www.metacase.com/products.html> (accessed 21 Oct 2020).
8. Partlow, J., et al. Analyze and Model Your Architecture, *Microsoft Doc*. Published at April 11, 2016. Available at: <http://docs.microsoft.com/en-us/visualstudio/modeling> (accessed 21 Oct 2020).
9. MetaCase. Available at: <http://www.metacase.com> (accessed 21 Oct 2020).
10. Eclipse Modeling Project, *The Eclipse Foundation*. Available at: <http://www.eclipse.org/modeling> (accessed 21 Oct 2020).
11. Gronback, R. C. Eclipse Modeling Project: A Domain-Specific Language (DSL) Toolkit. First Edition. Stoughton (MA), Addison-Wesley Professional, 2009, 736 p.
12. Voelter, M. The Design, Evolution, and Use of KernelF: An Extensible and Embeddable Functional Language. In: *Rensink A., Cuadrado J. S. (eds) Theory and Practice of Model Transformation: Proceedings of 11th International Conference on Theory and Practice of Model Transformations (ICMT 2018), Toulouse, France, June 25–26, 2018. Lecture Notes in Computer Science, 2018, Vol. 10888. Pp. 3–55.* DOI: 10.1007/978-3-319-93317-7\_1. Available at: <http://voelter.de/data/pub/kernelf-icmt.pdf> (accessed 18 Sep 2020).
13. Voelter M., Benz S., Dietrich C., et al. DSL Engineering: Designing, Implementing and Using Domain-Specific Languages. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013, 558 p.
14. Wortmann A., Beet M. Domain Specific Languages for Efficient Satellite Control Software Development, 8 p. Published at 2016. Available at: [http://mbeddr.com/files/dasia\\_wortmann.pdf](http://mbeddr.com/files/dasia_wortmann.pdf) (accessed 23 May 2020).
15. Filgueira J. M., Bec M., Liu N., et al. End-To-End Observatory Software Modeling Using Domain Specific Languages. In: *Chiozzi G., Radziwill N. M. (eds) Software and Cyberinfrastructure for Astronomy III: Proceedings of the SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Conference (Montreal, Canada, June 22–27, 2014). Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2014, Vol. 9152, 13 p.* Published online at July 18, 2014. DOI: 10.1117/12.2056718. Available at: [http://www.gmto.org/SPIE\\_2014/2014-SPIE-9152-58.pdf](http://www.gmto.org/SPIE_2014/2014-SPIE-9152-58.pdf) (accessed 22 July 2020).
16. Ujhelyi Z., Izsó B., Szatmári Z., et al. EMF-IncQuery: An Integrated Development Environment for Live Model Queries, *Science of Computer Programming*, 2015, Vol. 98, Pt. 1, Pp. 80–99. DOI: 10.1016/j.scico.2014.01.004.

Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167642314000082> (accessed 18 June 2020).

17. Belghiat A., Chaoui A. A Graph Transformation of Activity Diagrams into Pi-calculus for Verification Purpose, *Proceedings of the Third International Conference on Advanced Aspects of Software Engineering (ICAASE 2018), Constantine, Algeria, December 01–02, 2018. CEUR Workshop Proceedings*, 2018. Vol. 2326. Pp. 107–114. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2326/paper14.pdf> (accessed 18 Aug 2020).

18. Paige R. F., Kolovos D. S., Polack F. A. C. A Tutorial on Metamodelling for Grammar Researchers, *Science of Computer Programming*, 2014, Vol. 96, Pt. 4, Pp. 396–416. DOI: 10.1016/j.scico.2014.05.007.

19. Mooij A., Hooman J. Creating a Domain Specific Language (DSL) with Xtext. V10.0, 2019-10-14 — Eclipse IDE 2020-09 & Xtext 2.23. Nijmegen, Radboud University Nijmegen, 2020, 37 p. Available at: [http://www.cs.ru.nl/J.Hooman/DSL/Creating\\_a\\_Domain\\_Specific\\_Language\\_\(DSL\)\\_with\\_Xtext.pdf](http://www.cs.ru.nl/J.Hooman/DSL/Creating_a_Domain_Specific_Language_(DSL)_with_Xtext.pdf) (accessed 21 Oct 2020).

20. Idani A., Ledru Y., Wakrime A. A., et al. Towards a Tool-Based Domain Specific Approach for Railway Systems Modeling and Validation. In: *Collart-Dutilleul S., Lecomte T., et al. (eds) Reliability, Safety, and Security of Railway Systems. Modelling, Analysis, Verification, and Certification: Proceedings of Third International Conference on Reliability, Safety, and Security of Railway Systems (RSSRail 2019), Lille,*

*France, June 04–06, 2019. Lecture Notes in Computer Science*, 2019, Vol. 11495, Pp. 23–40.

DOI: 10.1007/978-3-030-18744-6\_2.

Available at: [http://vasco.imag.fr/tools/meeduse/papers/RSSRail\\_Idani\\_Chapter\\_Author.pdf](http://vasco.imag.fr/tools/meeduse/papers/RSSRail_Idani_Chapter_Author.pdf) (accessed 28 Oct 2020).

21. Berkenkötter K., Hannemann U., Peleska J. The Railway Control System Domain. Draft Version. Bremen, 2006.

Available at: <http://www.informatik.uni-bremen.de/agbs/research/RCSD/RCSDprofile.pdf> (accessed 18 Aug 2020).

22. Samonov A. V. Methods and Means for Automated Information Systems Development based on Ontology «Software and Hardware Complexes Quality Management» [Metody i sredstva razrabotki avtomatizirovannykh informatsionnykh sistem na osnove ontologii «Upravlenie kachestvom programmno-tehnicheskikh kompleksov»], *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS [Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN]*, 2019, Vol. 31, Is. 5, Pp. 165–182. DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(5)-13.

23. Kanso B., Taha S. Specification of Temporal Properties with OCL, *Science of Computer Programming*, 2014, Vol. 96, Pt. 4, Pp. 527–551.

DOI: 10.1016/j.scico.2014.02.029.

Available at: [http://www.researchgate.net/publication/260756267\\_Specification\\_of\\_temporal\\_properties\\_with\\_OCL](http://www.researchgate.net/publication/260756267_Specification_of_temporal_properties_with_OCL) (accessed 18 July 2020).

# Современные фреймворки для разработки web-приложений

А. А. Байдыбеков, к.воен.н. Р. Г. Гильванов, магистр И. А. Молодкин

Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I  
Санкт-Петербург, Россия

baydibekov98@gmail.com, gilvanov1950@mail.ru, molodkin@pgups.ru

**Аннотация.** В настоящее время активно развиваются технологии web-программирования. В статье выполнен обзор популярных фреймворков, технологий (MVC) и инструментов, предназначенных для разработки web-приложений с учетом современных стандартов. Дана характеристика архитектуры и типы фреймворков. Рассмотрены популярные серверные (Django, Python, Zend, PHP, JavaScript) и клиентские (Angular, React, Vue, Spring) фреймворки и языки программирования, с которыми они работают. Указаны достоинства и недостатки каждого из рассмотренных инструментальных средств.

**Ключевые слова:** web-технологии, фреймворк, разработка web-приложений, framework, MVC, Django, Python, Zend, PHP, Javascript, Angular, React, Vue, Spring.

## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире сложно представить крупную компанию и организацию без собственного web-приложения или сайта. Вместе с интересом организаций растет количество библиотек и фреймворков, нацеленных на облегчение разработки высококачественных web-приложений. Фреймворки сильно изменили мир программирования и стали неотъемлемой частью web-разработки, так как стандарты приложений постоянно модифицируются и, как следствие, растет сложность технологии. Использование готовых инструментов и библиотек, одобренных тысячами разработчиков по всему миру, является разумным подходом для создания многофункциональных и интерактивных web-приложений. Выбор фреймворка — задача не самая сложная, но при выборе следует учитывать их достоинства и недостатки.

## АРХИТЕКТУРА И ТИПЫ ФРЕЙМВОРКОВ

Фреймворк (англ. *Framework* — «каркас», «структура») — это динамически пополняемая библиотека языка программирования, в которой собраны его базовые модули. Фреймворки создаются для упрощения процессов разработки приложений, сайтов, сервисов. Чтобы не писать модуль в приложении с нуля, гораздо проще обратиться к готовым шаблонам фреймворков, которые и формируют рабочую среду разработчика.

Архитектура почти всех фреймворков основана на декомпозиции нескольких отдельных слоев (приложения, модули и т. д.) проекта. Это означает, что можно расширять функциональность приложения исходя из потребностей и использовать измененную версию вместе с кодом фреймворка или задействовать сторонние приложения. Такая гибкость является одним из ключевых преимуществ использования фреймворков [1].

MVC (англ. *Model-View-Controller* — «Модель-Представление-Контроллер») — концепция программирования, разделяющая классы на три группы, широко применяющаяся и при использовании фреймворков. Структура концепции представлена на рисунке 1.

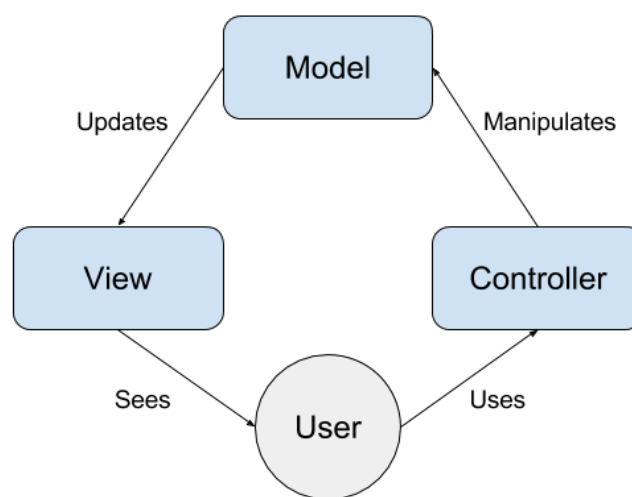


Рис. 1. Концепция MVC

Модель содержит все данные и уровни бизнес-логики, ее правила и функции.

Представление отвечает за визуальное отображение данных, например: диаграммы, графики и т. д.

Контроллер просто трансформирует данные для команд предыдущих двух составляющих [2].

У фреймворков есть две основные функции: работа на серверной стороне (бэк-энд) и работа на клиентской стороне (фронт-энд). Клиентская часть — это в основном HTML, CSS и JavaScript и рассматривается она как способ представления информации пользователям. Серверная часть, как правило, является наиболее сложной и описывает всю бизнес-логику приложения. Web-разработку серверной части можно выполнить на многих языках, таких как Java, Python, PHP и т. д.

## СЕРВЕРНЫЕ ФРЕЙМВОРКИ

Правила и архитектура таких фреймворков не дают возможности создать web-приложение с богатым интерфейсом. Они ограничены в своей функциональности, однако все равно можно создавать простые страницы и разные формы. Также они могут формировать выходные данные и отвечать за безопасность в случае атак. Все это определенно может упростить процесс разработки. Сер-

верные фреймворки в основном отвечают за отдельные, но критически важные части приложения, без которых оно не сможет нормально работать. Вот несколько самых популярных фреймворков и языки, с которыми они работают: Django — Python, Zend — PHP.

#### DJANGO

Высокоуровневый фреймворк, который является не только быстрым решением в веб-разработке, включающим все необходимое для качественного кода и прозрачного написания, но также и отличной платформой для работы с клиентурой того или иного бизнеса. Вместе с тем он удобен для разработчиков.

В Django реализован принцип DRY — Don't Repeat Yourself (рус. *не повторяйся*). То есть при использовании Django не нужно несколько раз переписывать один и тот же код. Фреймворк позволяет создавать сайт из компонентов. Благодаря этому сокращается время создания сайтов.

Фреймворк справляется с большим количеством задач и повышенными нагрузками. Его применяют для создания:

- CRM-систем (Customer Relationship Management) — систем управления отношениями с клиентами);
- CMS-систем (Content Management System) — систем управления содержимым (контентом) [3];
- коммуникационных платформ;
- сервисов бронирования номеров;
- платформ управления документооборотом [4].

Также Django подходит для создания алгоритмических генераторов, платформ для электронных рассылок, систем верификации, систем фильтрации с динамическими правилами и сложными параметрами, платформ для анализа данных и сложных вычислений, машинного обучения.

Реализовано объектно-реляционное отображение (Object-Relational Mapping, ORM), которое обеспечивает взаимодействие приложения с базами данных (БД). ORM автоматически передает данные из БД, например PostgreSQL или MySQL, в объекты, которые используются в коде приложения. включает механизмы предотвращения распространенных атак вроде SQL-инъекций (XSS, англ. *Cross-Site Scripting* — «межсайтовый скриптинг») и подделки межсайтовых запросов (CSRF, или XSRF, англ. *Cross-Site Request Forgery*) [4].

Django REST Framework, который часто сокращают до DRF, является библиотекой для построения программного интерфейса приложения, API (Application Programming Interface). Он имеет модульную и настраиваемую архитектуру, которая хорошо работает для создания как простых, так и сложных API. В DRF политики аутентификации и разрешений доступны «из коробки». Он поставляется с базовыми классами для CRUD-операций и встроенной утилитой для тестирования разрабатываемого API [5].

Плюсы:

- масса библиотек, что позволяет не писать базовую функциональность, а только лишь импортировать необходимое;
- подробная документация и дружелюбное сообщество, поэтому всегда гораздо проще найти уже готовые решения или получить помощь от сообщества;

- Django позволяет начать с малого и масштабироваться по мере необходимости.

Минусы:

- Django не поддерживает WebSockets, поэтому он плохо подходит для работы в реальном времени;
- готовые библиотеки часто снижают гибкость, Django является большим и монолитным фреймворком, и его компоненты развертываются совместно.

#### ZEND

Zend Framework — это объектно-ориентированная среда веб-приложений с открытым исходным кодом, представляющая собой набор профессиональных пакетов на основе PHP, разработанная и поддерживаемая компанией Zend. Это набор классов, большинство которых не привязаны к друг другу, а значит, их можно использовать как по частям в других проектах, так и полностью. В данном каркасе есть все, что нужно в современном веб-проекте. Данный фреймворк, как правило, больше всего используют при разработке крупных коммерческих проектов. Такие компании, как Google, Microsoft и Strikelron, сотрудничают с Zend, предоставляя интерфейсы для веб-сервисов и других технологий, которые они хотят сделать доступными разработчикам Zend. Компания участвует в разработке ядра языка программирования PHP [6].

Фреймворк использует различные пакеты, используя Composer как часть своих менеджеров зависимостей пакетов. Некоторые из них: PHPUnit для тестирования всех пакетов, Travis CI для служб непрерывной интеграции. Zend Framework предоставляет пользователям поддержку MVC в сочетании с решением Front Controller. Zend Framework следует стандартам PHP-FIG и включает реализацию PSR-7 для интерфейсов HTTP-сообщений. Поддержка нескольких систем баз данных и поставщиков, включая MariaDB, MySQL, Oracle, IBM DB2, Microsoft SQL Server, PostgreSQL, SQLite и Informix Dynamic Server [7].

С помощью служб удаленного вызова процедур (Remote Procedure Call, RPC) и REST (англ. *Representational State Transfer* — «передача состояния представления») Zend Apigility помогает разработчикам создавать и документировать API.

Zend Server обеспечивает улучшенную производительность для PHP, и особенно приложений Zend Framework, за счет ускорения кода операции и нескольких возможностей кэширования, а также включает средства мониторинга и диагностики приложений. Zend Studio является интегрированной средой разработки приложений (Integrated Development Environment, IDE), которая включает функции, специально предназначенные для упрощения работы с Zend Framework. Она обеспечивает MVC-представление, генерацию кода MVC на основе Zend\_Tool (компонент Zend Framework), предоставляет средства форматирования, анализа и исправления кода, помощь по параметрам и многое другое [8].

Достоинства:

- отлично подходит для разработки коммерческих веб-приложений;
- объектно-ориентированный подход к разработке;
- несвязанные компоненты для повторного использования в проектах.

Недостатки:

- тяжеловесный и ресурсоемкий, так как предоставляет разработчику массу возможностей и функций;
- не подходит для быстрой разработки проектов;
- недостаточно материалов для русскоязычного сегмента разработчиков.

#### КЛИЕНТСКИЕ ФРЕЙМВОРКИ

В отличие от серверных клиентские фреймворки никак не связаны с логикой приложения. Этот тип фреймворков работает в браузере. С их помощью можно улучшить и внедрить новые пользовательские интерфейсы. Фронт-энд-фреймворки позволяют создавать разные анимации и одностраничные приложения. Все клиентские фреймворки отличаются по функциональности и использованию. Рассмотрим подробно некоторые из них, использующие язык JavaScript.

#### ANGULAR

Angular — фреймворк с открытым исходным кодом, разработанный и поддерживаемый Google. Инструмент дает все необходимое для создания и управления динамическими front-end страницами для веб-приложения. В Angular имеется служба \$http, которая обеспечивает взаимодействие с удаленными HTTP-серверами с помощью XMLHttpRequest или JSONP [9]. При передаче объекта JavaScript на сервер он будет автоматически преобразован в строку JSON. После получения ответа служба также попытается преобразовать полученную строку JSON в JavaScript. Используя службу \$http можно создать собственную службу с полным контролем над обработкой URL и данных.

Angular создан для упрощения сложных процессов создания и управления JS-приложениями. Библиотека основана на обычном JS и HTML, поэтому Angular автоматически заботится о манипуляциях с DOM (англ. *Document Object Model* — объектная модель документа) и AJAX-запросах, которые в противном случае разработчикам пришлось бы писать самим. Инструмент предоставляет модульные строительные блоки кода JS, которые можно совмещать и тестировать. AngularJS можно быстро добавить на любую HTML-страницу с помощью простого тега. Благодаря поддержке TypeScript Angular является хорошим вариантом для разработки громоздких веб-приложений [10].

В Angular применяется двустороннее связывание: любые изменения в пользовательском интерфейсе сразу же отражаются на объектах приложения и наоборот. Фреймворк сам следит за событиями браузера, изменениями модели и действиями пользователя на странице, чтобы сразу обновлять нужные шаблоны. При этом в коде JavaScript не требуется хранить ссылки на DOM-элементы и явно ими манипулировать: просто описывается необходимый результат в терминах состояния модели и нет надобности использовать низкоуровневые конструкции.

Angular входит в пакет серверного программного обеспечения (ПО) MEAN, который также включает MongoDB, Express.js и Node.js [11]. Поэтому он позволяет управлять front-end и back-end проекта с помощью JavaScript. В качестве альтернативы для back-end можно использовать фреймворк Ruby on Rails (RoR), написанный на языке программирования Ruby.

Фреймворк применяется в разработке мобильных и веб-приложений. В дополнение к стандартному использованию одностраничного приложения с соответствующей библиотекой, такой как, например, Universal, возможно создание многостраничной версии. Что касается мобильной разработки, Google предоставил пользователям специальную платформу Ionic, нацеленную на создание и поддержку Native- и Progressive-приложений.

AngularJS построен по технике «functionality-first», поэтому фреймворк больше всего подходит для разработки сверху вниз. Модульная концепция AngularJS позволяет упростить разделение работы на разные команды в крупных проектах. В приоритете минимальное количество кода, поэтому приложения AngularJS, как правило, компактны и легки в редактировании.

Основные преимущества фреймворка Angular, повышающие скорость и производительность, — это синтаксис шаблона и интерфейс командной строки (Command Line Interface, CLI) для быстрого создания прототипов. Angular лучше всего подходит для написания одностраничных приложений, но его также используют и для разработки крупных корпоративных веб-приложений [12].

Плюсы:

- огромный информационный ресурс по изучению и обширное сообщество, предоставляющие программистам помощь при проектировании и разработке;
- декларативная парадигма программирования обеспечивает легковесность кода, что облегчает его чтение и поддержку;
- взаимозависимость функций, ввиду их связанности с компонентами и модулями;
- разбивка на модули позволяет загружать только нужные службы и эффективно выполнять автоматическое тестирование.

Минусы:

- сложный язык программирования, несмотря на то, что Angular использует Typescript 2.4;
- лишен гибкости при проектировании, так как очень «упрямый» и навязывает свою структуру разработчикам;
- поскольку Angular содержит интерактивные элементы встроженных страниц, страницы могут быть медленными;
- интеграционные ошибки, которые могут возникать при переходе от старой версии к новой.

#### REACT

ReactJS — это библиотека JavaScript, созданная Facebook в 2013 году, она превосходно подходит для создания масштабных веб-приложений, где данные могут меняться на регулярной основе.

React представил концепцию виртуального DOM, представляющий собой веб-страницы в браузере. React обладает собственным виртуальным DOM, который управляет фактическим DOM браузера и, так как он намного быстрее, чем DOM браузера, значительно повышает производительность. DOM React может создавать более 200 000 узлов в секунду, что превышает средний показатель узлов для большинства сайтов. Также он может воссоздавать изменения благодаря использованию алгоритма Diffing, который способен сократить вычисление разности от сложности  $O(n^3)$  до  $O(n)$ . DOM позволяет

объединять HTML-, XHTML- или XML-документы по определенным критериям, чаще всего в дерево, поэтому React отлично подходит для веб-браузеров при анализе разнообразных элементов веб-приложений [13].

Одной из замечательных особенностей React является введение JSX (расширения программного языка JavaScript). Необходимо понимать: JSX — это не HTML и не JavaScript. Прелесть JSX заключается в том, что он помогает разработчику визуализировать содержимое страниц, на нем гораздо проще писать, чем на традиционном JavaScript [12].

С точки зрения уровня сложности, React является одним из самых простых в освоении. Он основывается на легких языках программирования — достаточно вспомнить, как работает HTML. Не нужно глубоко изучать TypeScript, как в Angular, хватает поверхностных знаний. React приобрел известность благодаря архитектуре на основе компонентов, которую другие платформы начали использовать гораздо позднее. Такой структурный подход позволяет сравнительно быстро и просто создавать интерфейс. Стоит отметить, что библиотека направлена не только на создание пользовательского интерфейса одностраничного веб-приложения (Single Page Application, SPA), но и на мобильную разработку.

Платформа React Native — это фреймворк, нацеленный на разработку кроссплатформенных высококачественных приложений для iOS и Android. Преимуществами данного инструмента являются разнообразие совместимых модулей (Browserify, RequireJS, ECMAScript 6 и другие), установленные компоненты, однонаправленный поток кода, библиотека Redux [14].

Плюсы:

- легкий вес базы данных; процессы, происходящие со стороны пользователя, могут быть легко задействованы на сервере;
- связывание между собой данных гарантирует неизменность родительских данных, дочерние элементы не могут изменять цепочку данных;
- открытая библиотека данных ежедневно совершенствуется благодаря открытому исходному коду;
- высокий уровень гибкости и максимальная отзывчивость.

Минусы:

- отсутствие упорядоченной документации, сверхбыстрый обмен решениями в ReactJS не оставляет места для упорядочения документации, документы размещены немного хаотично;
- слишком огромный выбор действий для решения определенных проблем — количество этих решений может сбить с толку;
- плохая кроссбраузерная поддержка.

#### VUE

По заявлению разработчиков, Vue — прогрессивный JavaScript-фреймворк для разработки пользовательского интерфейса. Отличительной чертой Vue от монструозных фреймворков является высокая степень адаптивности. Она заключается в ориентированности на уровень представления (View) и простоте интеграции других библиотек или в существующие проекты [15].

Vue позволяет разрабатывать сложные одностраничные приложения (SPA) за счет расширения HTML-атрибутов так называемыми директивами. Существуют как встроенные директивы, так и определяемые программистом.

Vue и рассмотренный ранее React очень похожи. Скорость работы обоих фреймворков очень высока, однако существуют некоторые нюансы функционирования Vue, на которые стоит обратить внимание.

В отличие от React, в котором изменение состояния компонента ведет к перерисовке всего поддерева этого компонента, Vue автоматически отслеживает зависимости компонентов. Такой подход позволяет системе точно знать, какие компоненты необходимо перерисовывать. Это устраняет необходимость целого класса оптимизаций.

В React все построено на JavaScript, Vue же охватывает классические веб-технологии и основывается на них.

React отличается сложностью изучения, поскольку для применения этого фреймворка необходимо владеть знаниями о JSX и ES2015+ и системах сборки. Все эти знания не являются обязательными для начала разработки на Vue [16].

По сравнению с Angular, Vue имеет слегка большую производительность [17].

Как уже было сказано ранее, для работы с Angular требуется знание TypeScript. Применение TypeScript имеет свои преимущества, такие, как проверка статических типов, однако это ведет к увеличению накладных расходов. Vue предоставляет официальные декларации типов и официальный декоратор для тех, кто хочет использовать TypeScript вместе с Vue.

API Angular содержит множество элементов и концепций, что требует большого времени для изучения. Все, что необходимо знать для работы с Vue — HTML и стандартный JavaScript.

Размер полнофункционального проекта с Vue (Vue Router + Vuex) значительно меньше, чем с Angular (~30 кБ против 65 кБ).

В отличие от Angular Vue позволяет использовать различные системы сборки, не ограничивая разработчиков в том, какую структуру использовать для приложения.

Разработка фреймворка началась в июле 2013 года и активно продолжается до сих пор.

#### SPRING

Одним из самых популярных фреймворков для Java Enterprise Edition является Spring, который позволяет разрабатывать надежные и высококачественные приложения для различных сфер применения [18].

Фреймворк Spring разработан Родом Джонсоном в 2003 году как ответ на сложную спецификацию J2EE и включил в себя следующие спецификации:

- Servlet API (JSR 340);
- WebSocket API (JSR 356);
- Concurrency Utilities (JSR 236);
- JSON Binding API (JSR 367);
- Bean Validation (JSR 303);
- JPA (JSR 338);
- JMS (JSR 914).

Spring также поддерживает внедрение зависимостей (Dependency injections) и общие аннотации (Common annotations), которые могут быть применены вместо характерных для фреймворка механизмов [19].

Для работы с фреймворком версии 5.1 требуется JDK8+. Интегрирована поддержка JDK11 LTS, что обеспечивает полную совместимость с такими программами, как Tomcat 8 и 9, WebSphere 9 и т. д.

Существуют различные сценарии применения Spring как в больших серверных проектах, так и автономных приложениях, которые не требуют наличия облака.

Открытость исходного кода позволила привлечь к разработке фреймворка большое сообщество, которое непрерывно совершенствует его возможности и увеличивает сферу применения.

Фреймворк разделен примерно на 20 модулей, сгруппированных по назначению (рис. 2). При разработке приложений необходимо выбрать требуемые модули. Основу составляют модули контейнера ядра (Core Container), которые включают конфигурационную модель и механизм внедрения зависимостей. Помимо этого, Spring предоставляет поддержку различных архитектур приложений, включая мессенджеры и веб. Также существует основанный на технологии сервлетов фреймворк Spring MVC WEB [20].

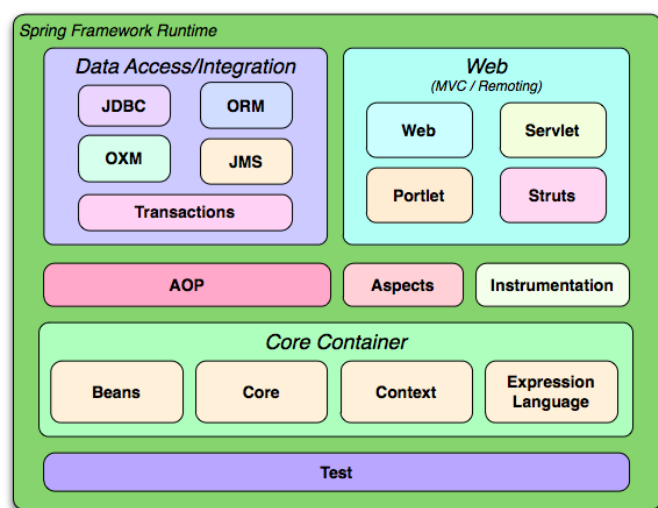


Рис. 2. Модули Spring

Группа модулей доступа к данным и интеграции (Data Access/Integration) призвана облегчить работу с различными БД и API. Так, например, модуль JDBC (Java DataBase Connectivity) избавляет от необходимости рутинного написания кода для работы с базами данных и обработки специфичных для конкретной БД ошибок, а модуль JMS (Java Messaging Service) содержит инструменты для создания и получения сообщений.

Модули Web предоставляют различные инструменты для работы с веб. Одноименный модуль позволяет организовать базовые веб-возможности, такие как загрузка файлов по частям, инициализация зависимостей в прослушателях сервлетов и ориентированный на веб контекст приложений. Модуль сервлетов содержит реализацию веб-приложений по шаблону MVC, что позволяет интегрировать все в рамках одного фреймворка.

Поддержка фреймворков для тестирования JUnit и TestNG обеспечивается модулем Test.

Spring продолжает развиваться и разработчики внедряют в него новые возможности. Помимо самого фрейм-

ворка Spring существуют и другие проекты: Spring Boot, Spring Security, Spring Data, Spring Cloud, Spring Batch. Это создает целую экосистему для эффективной разработки ПО.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фреймворки для веб-разработки во многом похожи, даже если реализованы на разных языках программирования. Тем не менее каждый из перечисленных фреймворков индивидуален. У них разные подходы, методы и поведение в разработке. Нельзя выбрать лучший фреймворк среди имеющихся, все зависит от того, с чем планируется работать [21–23]. Фреймворки имеют массу различных преимуществ и недостатков. Можно сравнить все функции и технологии, перечисленные в этой статье, чтобы было легче понять, какой из фреймворков лучше подходит для бизнеса или потребностей конкретного проекта, и сделать правильный выбор, наблюдая в итоге, как выбранные инструменты и библиотеки оказывают огромную помощь в работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Веб-фреймворки: введение для новичков. — 02.08.2018 / Пер. с англ. // Tproger — типичный программист. URL: <http://tproger.ru/translations/web-frameworks-how-to-get-started> (дата обращения: 03.08.2020).
2. Фрэнк, Б. HTML5 и CSS3. Разработка сайтов для любых браузеров и устройств. Второе издание = Responsive Web Design with HTML5 and CSS3. Second Edition / Пер. с англ. Н. Вильчинского. — Санкт-Петербург: Питер, 2017. — 272 с. — (Библиотека программиста).
3. Данжу, Д. Путь Python. Черный пояс по разработке, масштабированию, тестированию и развертыванию = Serious Python. Black-Belt Advice on Deployment, Scalability, Testing, and More / Пер. с англ. П. Ковалёва. — Санкт-Петербург: Питер, 2020. — 256 с. — (Библиотека программиста).
4. Форсье, Д. Django. Разработка веб-приложений на Python / Д. Форсье, П. Биссекс, У. Чан; пер. с англ. А. Киселева. — Санкт-Петербург: Символ-плюс, 2009. — 456 с. — (Серия «High tech»).
5. Django: The Web framework for perfectionists with deadlines. URL: <http://www.djangoproject.com> (дата обращения: 01.08.2020).
6. Zend Framework 3 // Zend Framework — Documentation. URL: <http://framework.zend.com/learn> (дата обращения: 28.07.2020).
7. Зандстра, М. PHP: объекты, шаблоны и методики программирования. Пятое издание = PHP Objects, Patterns, and Practice / Пер. с англ. И. В. Берштейна; под ред. С. Г. Тригуб. — Санкт-Петербург: Диалектика, 2019. — 736 с.
8. Васвани, В. Zend Framework. Разработка веб-приложений на PHP = Zend Framework: A Beginner's Guide / Пер. с англ. Р. Тетерина. — Санкт-Петербург: Питер, 2012. — 432 с. — (Библиотека программиста).
9. Рейсиг, Д. JavaScript. Профессиональные приемы программирования = Pro JavaScript™ Techniques / Пер. с англ. Н. Вильчинского. — Санкт-Петербург: Питер, 2008. — 352 с. — (Библиотека программиста).
10. Angular. JavaScript-фреймворк // Habr. URL: <http://habr.com/ru/hub/angular> (дата обращения: 04.08.2020).

11. Angular. URL: <http://angular.io> (дата обращения: 04.08.2020).

12. Файн, Я. Angular и TypeScript. Сайтостроение для профессионалов = Angular 2 Development with TypeScript / Я. Файн, А. Моисеев; пер. с англ. Н. Вильчинского, Е. Зазнобы. — Санкт-Петербург: Питер, 2018. — 464 с. — (Библиотека программиста).

13. React. JavaScript-библиотека для создания пользовательских интерфейсов. URL: <http://ru.reactjs.org> (дата обращения: 03.08.2020).

14. Стефанов, С. React.js. Быстрый старт = React: Up & Running / Пер. с англ. Н. Вильчинского. — Санкт-Петербург: Питер, 2017. — 304 с. — (Серия «Бестселлеры O'Reilly»).

15. Vue.js — Introduction // Vue.js. URL: <http://vuejs.org/v2/guide/index.html> (дата обращения: 08.12.2020).

16. Vue.js — Comparison with Other Frameworks // Vue.js. URL: <http://vuejs.org/v2/guide/comparison.html> (дата обращения: 08.12.2020).

17. Results for js web frameworks benchmark — round 4. Table Report — 12.09.2016 // Stefan\_Krause.blog().

URL: <http://stefankrause.net/js-frameworks-benchmark4/webdriver-ts/table.html> (дата обращения: 08.12.2020).

18. Spring Framework Overview. Version 5.3.2. URL: <http://docs.spring.io/spring-framework/docs/current/reference/html/overview.html> (дата обращения: 08.12.2020).

19. Spring 5 для профессионалов. Пятое издание = Spring 5. Fifth Edition / Ю. Козмина, Р. Харроп, К. Шефер, К. Хо; пер. с англ. и ред. И. В. Берштейна. — Санкт-Петербург: Диалектика, 2019. — 1120 с.

20. Introduction to Spring Framework. URL: <http://docs.spring.io/spring-framework/docs/3.0.x/spring-framework-reference/html/overview.html> (дата обращения: 08.12.2020).

21. Мещеряков, Е. В. Публикация баз данных в интернете: Практическое руководство / Е. В. Мещеряков, А. Д. Хомоненко. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2001. — 552 с. — (Серия «Мастер»).

22. Хомоненко, А. Д. Разработка web-приложений для работы с базами данных: Учебное пособие / А. Д. Хомоненко, В. В. Рогальчук, А. В. Тырва. — Санкт-Петербург: ПГУПС, 2012. — 87 с.

23. Разработка приложений с Web-интерфейсом для работы с базами данных: Методические указания для студентов, обучающихся по направлениям «Информатика и вычислительная техника» и «Информационные системы и технологии» / Сост. В. В. Рогальчук, А. Д. Хомоненко. — Санкт-Петербург: ПГУПС, 2017. — 24 с.

# Modern Frameworks for Web Development

A. A. Baidybekov, PhD R. G. Gilvanov, Master of Science I. A. Molodkin  
Emperor Alexander I Petersburg State Transport University  
Saint Petersburg, Russia  
baydibekov98@gmail.com, gilvanov1950@mail.ru, molodkin@pgups.ru

**Abstract.** Currently, web programming technologies are actively developing. The article provides an overview of popular frameworks, technologies (MVC) and tools designed for developing web applications taking into account modern standards. Characteristics of architecture and types of frameworks are given. Popular server-side (Django, Python, Zend, PHP, Javascript) and client-side (Angular, React, Vue, Spring) frameworks and programming languages with which they work are considered. The advantages and disadvantages of each considered tool are indicated.

**Keywords:** web technologies, web application development, framework, MVC, Django, Python, Zend, PHP, Javascript, Angular, React.

## REFERENCES

1. Web Frameworks: How To Get Started [Veb-freymvorki: vvedenie dlya novichkov], *Tproger*. Published online at 02 Aug 2018. Available at: <https://tproger.ru/translations/web-frameworks-how-to-get-started> (accessed 03 Aug 2020).
2. Frain B. Responsive Web Design with HTML5 and CSS3. Second Edition [HTML5 i CSS3. Razrabotka saytov dlya lyubikh brauzerov i ustroystv. Vtoroe izdanie]. St. Petersburg, Piter Publishing House, 2017, 272 p.
3. Danjou J. Serious Python. Black-Belt Advice on Deployment, Scalability, Testing, and More [Put' Python. Chernyy poyas po razrabotke, masshtabirovaniyu, testirovaniyu i razvertyvaniyu]. St. Petersburg, Piter Publishing House, 2020, 256 p.
4. Forcier J., Bissex P., Chun W. Django. Python web development with Django [Django. Razrabotka veb-prilozheniy na Python]. St. Petersburg, Symbol Plus Publishing House, 2009, 456 p.
5. Django: The Web framework for perfectionists with deadlines. Available at: <http://www.djangoproject.com> (accessed 01 Aug 2020).
6. Zend Framework 3, *Zend Framework — Documentation*. Available at: <http://framework.zend.com/learn> (accessed 28 July 2020).
7. Zandstra M. PHP Objects, Patterns, and Practice [PHP: ob"yekty, shablony i metodiki programirovaniya]. St. Petersburg, Dialektika Publishers, 2019, 736 p.
8. Vaswani V. Zend Framework: A Beginner's Guide [Zend Framework. Razrabotka veb-prilozheniy na PHP]. St. Petersburg, Piter Publishing House, 2012, 432 p.
9. Resig J. Pro JavaScript™ Techniques [JavaScript. Professional'nye priemy programirovaniya]. St. Petersburg, Piter Publishing House, 2008, 352 p.
10. Angular. JavaScript framework [Angular. JavaScript-freymvork], *Habr [Khabr]*. Available at: <http://habr.com/ru/hub/angular> (accessed 04 Aug 2020).
11. Angular. Available at: <http://angular.io> (accessed 04 Aug 2020).
12. Fain Y., Moiseev A. Angular and TypeScript. Site building for professionals [Angular i TypeScript. Saytostroenie dlya professionalov]. St. Petersburg, Piter Publishing House, 2018, 464 p.
13. React. JavaScript library for creating user interfaces [React. JavaScript-biblioteka dlya sozdaniya pol'zovatel'skikh interfeysov]. Available at: <http://ru.reactjs.org> (accessed 04 Aug 2020).
14. Stefanov S. React: Up & Running [React.js. Bystryy start]. St. Petersburg, Piter Publishing House, 2017, 304 p.
15. Vue.js — Introduction, *Vue.js*. Available at: <http://vuejs.org/v2/guide/index.html> (accessed 08 Dec 2020).
16. Vue.js — Comparison with Other Frameworks, *Vue.js*. Available at: <http://vuejs.org/v2/guide/comparison.html> (accessed 08 Dec 2020).
17. Results for js web frameworks benchmark — round 4. Table Report, *Stefan\_Krause.blog()*. Published online at 12 September 2016. Available at: <http://stefankrause.net/js-frameworks-benchmark4/webdriver-ts/table.html> (accessed 08 Dec 2020).
18. Spring Framework Overview. Version 5.3.2. Available at: <http://docs.spring.io/spring-framework/docs/current/reference/html/overview.html> (accessed 08 Dec 2020).
19. Cosmina I., Harrop R., Schaefer C., Ho C. Spring 5. Fifth Edition [Spring 5 dlya professionalov. Pyatoe izdanie]. St. Petersburg, Dialektika Publishers, 2019, 1120 p.
20. Introduction to Spring Framework. Available at: <http://docs.spring.io/spring-framework/docs/3.0.x/spring-framework-reference/html/overview.html> (accessed 08 Dec 2020).
21. Meshcheryakov E. V., Khomonenko A. D. Publishing databases on the Internet [Publikatsiya baz dannykh v internete]. St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2001, 552 p.
22. Khomonenko A. D., Rogalchuk V. V., Tyrva A. V. Developing web applications for working with databases: Study guide [Razrabotka veb-prilozheniy dlya raboty s bazami dannykh: Uchebnoe posobie]. Saint Petersburg, PSTU, 2012, 87 p.
23. Rogalchuk V. V., Khomonenko A. D. Development of Web-based applications for working with databases: Guidelines [Razrabotka prilozheniy s Web-interfeysom dlya raboty s bazami dannykh: Metodicheskie ukazaniya]. Saint Petersburg, PSTU, 2017, 24 p.

# Модернизация квантового протокола генерации ключей в целях устранения проблемы открытой части канала

д.т.н. Е. Г. Воробьев, Д. Е. Воробьева

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)  
Санкт-Петербург, Россия  
vrbyug@mail.ru

**Аннотация.** Предлагается метод синтеза квантовых протоколов на основе управляемых состояний поляризации. Возможно создание квантовых протоколов, в которых не используется открытый подканал связи для реализации согласования. Вмешательство злоумышленника в такой открытый подканал может привести к неработоспособности всего протокола в целом. В предлагаемом методе передаваемый код статистически приближается к случайному, как в квантовом подканале. Целью синтеза должен быть сигнал в канале передачи, для которого выполняется критерий Шеннона для теоретически невскрываемого шифра — вероятность 0,5 для правильного распознавания состояния информационного бита. Анализ передаваемой информации становится невозможным, так как нули и единицы в передаче не информационные, они означают лишь совпадение или несовпадение состояния бита передаваемой информации и управляющего процесса. Поставлена и решена задача синтеза алгоритма оптимального приема двух ортогонально поляризованных сигналов на одной частоте со смешанными мгновенными состояниями поляризационных параметров на основе уравнения оценки дискретного параметра.

**Ключевые слова:** квантовая криптография, управляемая поляризация, псевдослучайные последовательности, квантовый протокол, передача информации.

## ВВЕДЕНИЕ

Появление квантовой криптографии ознаменовало собой переход к защищенным технологиям передачи информации на основе использования управляемой поляризации, когда каждый бит формируется за счет разных состояний поляризационных параметров световой волны.

Внедряемые сейчас за рубежом протоколы BB84, B92 [1] построены на принципе формирования на передающей стороне случайного набора поляризационно-модулированных битов и фиксированных настроек поляризационных фильтров на приемной стороне, что требует дальнейшего обсуждения по открытому каналу с целью выделения правильной информации. Протокол Экерта [1] использует взаимодействие двух бинарных процессов на передающей и приемной стороне за счет создания «связанных» частиц на физическом уровне, что технологически трудно реализуемо.

Тем не менее, возможно создание отечественных квантовых протоколов свободных от недостатков западных подходов. Целью синтеза должен быть сигнал в канале передачи, для которого выполняется критерий Шеннона для теоретически невскрываемого шифра — вероятность 0,5 для правильного распознавания состояния информационного бита.

Для этого достаточно сформировать на приемной стороне *ожидаемое* состояние поляризации на каждый передаваемый бит, тогда для передачи единицы это состояние должно быть сформировано на передающей стороне, а для передачи нуля — противоположное. Оно не выделяется фильтром, подключенным в этот момент на приемной стороне, но носит характер единицы для любого злоумышленника, прослушивающего канал.

В простейшем случае для бинарной передачи информации достаточно иметь два фильтра, переключаемых под управлением любой сгенерированной по ГОСТ 34.12-2018 двоичной последовательности, известной также на передающей стороне.

Анализ передаваемой информации злоумышленником становится невозможным, так как нули и единицы в передаче не информационные, они означают лишь совпадение или несовпадение состояния бита передаваемой информации и управляющего процесса.

Управляемая поляризация решает проблему защиты технического канала утечки с оптических линий связи и снижает риск применения линейного и дифференциального криптоанализа.

## ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА АЛГОРИТМОВ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИЕМА ОРТОГОНАЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННЫХ СИГНАЛОВ

По аналогии с математической моделью ФМ-ПСП сигнала [2, 3] в настоящей статье предлагается модель поляризационно-модулированных с псевдослучайной последовательностью (ПМ-ПСП) широкополосных сигналов. Модель ПМ-ПСП сигнала на интервале действия  $k$ -й информационной посылки с учетом двух поляризационно-манипулируемых позиций может быть представлена выражением

$$s^k(t) = (-\mu(t - t_t^k)\xi_0 + x^k \xi_t^k) A(t) \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $\mu(t - t_t^k)$  — ПСП со значениями  $\pm 1$  и с задержкой  $t_t^k$  относительно отсчета начального состояния поляризации  $\xi_0$ ;  $A(t)$ ,  $\xi_t^k$  — соответственно случайные амплитуда и значение параметра поляризации, определяемое специальной функцией;  $x^k = \pm 1$  — информационный символ. ПСП, в отличие от существующих систем, динамически изменяет текущее состояние поляризации в канале.

В качестве модели информационного сигнала примем обычный телеграфный сигнал с длительностью посылки  $T$  и фиксированными моментами перехода:  $t_0, t_1, \dots, t_k, \dots$ , где

$t_k = t_o + kT, k = 0, 1, 2, \dots$ . Будем считать также, что последовательность значений дискретного параметра  $x^k$  образует однородную цепь Маркова. В этом случае для двух ортогонально поляризованных сигналов  $s_1^k(t)$  и  $s_2^k(t)$ , являющихся компонентами вектора  $s^k(t)$ , в соответствии с (1), справедливо представление:

$$\begin{aligned} s_1^k(t) &= (-\mu_1(t - \tau_{1t}^k)\xi_{01} + x_1^k \xi_{1t}^k)A_1(t) \cos(\omega t + \phi_0), \\ s_2^k(t) &= (-\mu_1(t - \tau_{2t}^k)\xi_{02} + x_2^k \xi_{2t}^k)A_2(t) \cos(\omega t + \phi_0). \end{aligned} \quad (2)$$

Две однородные марковские цепи  $x_1$  и  $x_2$  с известными и совпадающими моментами перехода с двумя значениями заменим одной однородной марковской цепью  $\theta(t) = i$  с четырьмя состояниями:

$$\begin{aligned} i = 1 = \theta(t) &\Leftrightarrow x_1^k = -1, x_2^k = -1; \\ i = 3 = \theta(t) &\Leftrightarrow x_1^k = -1, x_2^k = +1; \\ i = 2 = \theta(t) &\Leftrightarrow x_1^k = +1, x_2^k = -1; \\ i = 4 = \theta(t) &\Leftrightarrow x_1^k = +1, x_2^k = +1. \end{aligned} \quad (3)$$

Поскольку моменты изменения состояния дискретного марковского процесса  $x^k$  фиксированы ( $t_k = t_o + kT, k = 0, 1, 2, \dots$ ), то вероятность перехода

$$p\left(j, t + \frac{\tau}{i}, t\right) = p\left\{\theta(t + \tau) = \frac{j}{\theta(t)} = i\right\}$$

в непрерывном времени принимает значения:

$$p\left(j, t + \frac{\tau}{i}, t\right) = \begin{cases} \delta_{ij}, & \text{если } t_k \leq t, t + \tau < t_{k+1}, \\ \pi_{ij}. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера.

Трой случай возникает, если  $t$  и  $t + \tau$  принадлежат различным интервалам. В точках  $t = t_k, k = 0, 1, 2, \dots$  вероятность перехода  $p(\cdot)$  терпит разрыв:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} p\left(j, t_k + \frac{\varepsilon}{i}, t_k - \varepsilon\right) = \pi_{ij}, \quad \varepsilon > 0,$$

Будем считать заданными  $\Pi = \{\pi_{ij}\}, i, j = \overline{1,4}$  — матрицу перехода из  $i$ -го в  $j$ -е состояние и  $p = \{p_i\}, i = \overline{1,4}$  — вектор вероятностей начального состояния.

На согласованных нагрузках двух ортогонально поляризованных приемных антенн при анизотропных каналах связи уравнения наблюдения:

$$y_1^k(t) = a_{11}s_1^k(t) + a_{12}s_2^k(t) + v_1^k(t) = s_1^k(t) + v_1^k(t), \quad (5)$$

$$y_2^k(t) = a_{21}s_1^k(t) + a_{22}s_2^k(t) + v_2^k(t) = s_2^k(t) + v_2^k(t), \quad (6)$$

где  $H = \{a_{ij}\}$  — матрица наблюдения с недиагональными элементами  $a_{12}, a_{21}$ , характеризующими наличие кросс-поляризованных переходных помех в ортогонально поляризованных каналах приема;

$v_i^k(t) = \begin{pmatrix} v_1^k(t) \\ v_2^k(t) \end{pmatrix}$  — вектор шумов наблюдения с нулевым математическим ожиданием и корреляционной матрицей

$$\langle v(t)v^T(t) \rangle = N_v \delta(t + \tau), \quad N_v = \begin{pmatrix} N_{11}^{(v)} & N_{12}^{(v)} \\ N_{21}^{(v)} & N_{22}^{(v)} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Шум наблюдения  $v(t)$  в соответствии с (7) может быть частично поляризованным.

Таким образом, прием заключается в получении соответствующих оценок дискретных параметров  $\hat{x}_1^k$  и  $\hat{x}_2^k$  по наблюдениям (5), (6). Для этого воспользуемся результатами марковской теории нелинейной фильтрации дискретно-непрерывных процессов.

Выразим принимаемые сигналы (2) через квадратурные составляющие:

$$\begin{cases} s_1^k(t) = x_1^k \mu_1(t - \tau_{1t}^k) [\lambda_1^k(t) \cos \omega t + \lambda_2^k(t) \sin \omega t] \\ s_2^k(t) = x_2^k \mu_2(t - \tau_{2t}^k) [\lambda_3^k(t) \cos \omega t + \lambda_4^k(t) \sin \omega t] \end{cases} \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} \lambda_1^k(t) &= (\xi_{01} + \xi_{1t}^k)A_1(t) \cos(\phi_0), \lambda_3^k(t) = (\xi_{02} + \xi_{2t}^k)A_2(t) \cos(\phi_0), \\ \lambda_2^k(t) &= (\xi_{01} + \xi_{1t}^k)A_1(t) \sin(\phi_0), \lambda_4^k(t) = (\xi_{02} + \xi_{2t}^k)A_2(t) \sin(\phi_0) \end{aligned}$$

— квадратурные компоненты, представляющие собой компоненты поляризационного четырехмерного вектора. Кроме четырех случайных непрерывных компонентов, входящих в (8), имеется еще два:  $\tau_{1t}^k$  и  $\tau_{2t}^k$ , которые соответственно обозначим  $\lambda_5^k(t)$  и  $\lambda_6^k(t)$ . Объединяя все переменные  $\lambda_i(t)$  в один вектор  $\Lambda_t$ , получаем стохастическое дифференциальное уравнение состояния:

$$d\Lambda_t/dt = f(\Lambda_t, t) + G(t)n(t). \quad (9)$$

Для ВОЛС можно положить распределение вероятностей огибающей сигналов, распределенной по обобщенному рэлеевскому закону [4, 5]. В этом случае вектор-функция

$$f(\Lambda_t, t) = -\alpha_i(\lambda_{it} - \lambda_{0t}), \quad i = \overline{1,6} \quad (10)$$

где  $\lambda_{it}, \lambda_{0t}$  — соответственно случайные и регулярные компоненты вектора  $\Lambda_t$ .

Стохастические дифференциальные уравнения оценки непрерывных параметров  $\lambda_{it}$  принимают вид:

$$\frac{d\hat{\lambda}_{it}}{dt} = f_i(\Lambda_t, t) + \sum_{j=1}^6 K_{ij}(t) \frac{\partial(F(\hat{\Lambda}_t t))}{\partial \hat{\lambda}_{it}} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{dK_{ij}(t)}{dt} &= \sum_{j=1}^6 \left[ \frac{\partial f_i(\hat{\Lambda}_t t)}{\partial \lambda_{vt}} K_{vj}(t) + \frac{\partial f_i(\hat{\Lambda}_t t)}{\partial \lambda_{vt}} K_{iv}(t) \right] + \\ &+ G^T N_n G + \sum_{v=1}^6 \sum_{\mu=1}^6 K_{iv}(t) \frac{\partial(F(\hat{\Lambda}_t t))}{\partial \lambda_{vt} \partial \mu t}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\langle F(\hat{\Lambda}_t, t) \rangle = \sum_{i=1}^4 F_i(\hat{\Lambda}_t, t) p(t, i/\hat{\Lambda}_t)$  — функционал, включающий в себя производную по времени наблюдения от логарифма функции правдоподобия  $F_i(\hat{\Lambda}_t, t)$  и условной апостериорной вероятности  $p(t, i/\hat{\Lambda}_t), i = \overline{1,4}$  [6].

Для условной апостериорной вероятности, в предположении медленных по сравнению с длительностью элементарной информационной посылки  $T$  изменений непрерывных параметров ( $\tau_\lambda \gg T$ ), что справедливо для спутниковых и других рассматриваемых каналов связи, получено уравнение

$$p(t, i/\hat{\Lambda}_t) = \frac{p(t_k + 0, i/\hat{\Lambda}_t) \exp\left\{\int_{t_k}^t F_i(\hat{\Lambda}_\tau, \tau) d\tau\right\}}{\sum_{i=1}^4 p(t_k + 0, i/\hat{\Lambda}_t) \exp\left\{\int_{t_k}^t F_i(\hat{\Lambda}_\tau, \tau) d\tau\right\}}, \quad (13)$$

где

$$t \in (t_k, t_{k+1}); p(t_k + 0, i/\hat{\Lambda}_t) = \sum_{j=1}^4 \pi_{ij} p(t_k - 0, j/\hat{\Lambda}_t). \quad (14)$$

Для рассматриваемых четырех состояний функция

$$F_i(\hat{\Lambda}_t, t) = F(\hat{\Lambda}_t, i, t) = F(\hat{\Lambda}_t, \theta(t) = i, t) = \sum_{\alpha=1}^2 \sum_{\beta=1}^2 F_{i\alpha\beta}(\hat{\Lambda}_t, t) \quad (15)$$

где

$$F_{i\alpha\beta} = (N_v^{-1})_{\alpha\beta} \{2y_\beta(t)\hat{s}_{i\alpha}(t) + \hat{s}_{i\alpha}(t)\hat{s}_{i\beta}(t)\}, \quad (16)$$

$s_{i(\alpha,\beta)}(t) = s_{\alpha\beta}(\hat{\Lambda}_t, \theta(t) = i, t)$  — оценка принимаемого сигнала, входящего в (5), (6).

Получим выражение для  $\langle F(\hat{\Lambda}_t, t) \rangle$ . Для большинства цифровых систем связи на практике выполняется условие равновероятного появления информационных символов, поэтому примем  $\pi_{ij} = 1/4$ ,  $i, j = \overline{1,4}$ . С учетом (14) на каждом интервале получим

$$p(t_k + 0, i/\hat{\Lambda}_t) = \sum_{j=1}^4 \pi_{ij} p(t_k - 0, j/\hat{\Lambda}_t) = 1/4. \quad (17)$$

Шум наблюдения  $v(t)$ , входящий в уравнение наблюдения (7), можно считать неполяризованным, что позволяет опустить недиагональные члены матрицы  $N_{ij}^{(v)}$ . Тогда (15) примет вид

$$F_{i\alpha\beta} = F_{i11}(\hat{\Lambda}_t, t) + F_{i22}(\hat{\Lambda}_t, t). \quad (18)$$

С помощью подстановки (16) в (18) получаем

$$F_i(\hat{\Lambda}_t, t) = \frac{2}{N_v} \{x_1\mu_1[\lambda_1(a_{11}y_1^c + a_{21}y_2^c) + \lambda_2(a_{11}y_1^s + a_{21}y_2^s)] + x_2\mu_2[\lambda_3(a_{12}y_1^c + a_{22}y_2^c) + \lambda_4(a_{12}y_1^s + a_{22}y_2^s)] - (a_{11}^2 + a_{21}^2)(\lambda_1^2 + \lambda_2^2) - (a_{12}^2 + a_{22}^2)(\lambda_3^2 + \lambda_4^2) - (a_{11}a_{12} + a_{21}a_{22})(\lambda_1\lambda_3 + \lambda_2\lambda_4)x_1x_2\mu_1\mu_2\}, \quad (19)$$

где  $y_{1,2}^c = y_{1,2}^k \cos \omega t$ ;  $y_{1,2}^s = y_{1,2}^k \sin \omega t$ .

Учитывая значения  $x_i$ ,  $i=1, 2$  из (3) и используя (13), (17) и (19), получаем:

$$\langle F(\hat{\Lambda}_t, t) \rangle = \frac{2}{N_v} [(a_{11}^2 + a_{21}^2)(\hat{\lambda}_1^2 + \hat{\lambda}_2^2) + (a_{12}^2 + a_{22}^2)(\hat{\lambda}_3^2 + \hat{\lambda}_4^2)] + \frac{Y_1 [th \int_{t_k}^t Y_1 d\tau + th \int_{t_k}^t Y_2 d\tau] - Y_2 [th \int_{t_k}^t Y_1 d\tau th \int_{t_k}^t Y_2 d\tau - th \int_{t_k}^t Y_2 d\tau]}{1 - th \int_{t_k}^t Y_1 d\tau th \int_{t_k}^t Y_2 d\tau th \int_{t_k}^t Y_2 d\tau} - \frac{Y_{12} [th \int_{t_k}^t Y_1 d\tau th \int_{t_k}^t Y_2 d\tau - th \int_{t_k}^t Y_2 d\tau]}{1 - th \int_{t_k}^t Y_1 d\tau th \int_{t_k}^t Y_2 d\tau th \int_{t_k}^t Y_2 d\tau}. \quad (20)$$

$$Y_1 = \frac{2}{N_v} \mu_1(t - \tau_{1t}^k) [\hat{\lambda}_1(a_{11}y_1^c + a_{21}y_2^c) + \hat{\lambda}_2(a_{11}y_1^s + a_{21}y_2^s)],$$

$$Y_2 = \frac{2}{N_v} \mu_2(t - \tau_{2t}^k) [\hat{\lambda}_3(a_{12}y_1^c + a_{22}y_2^c) + \hat{\lambda}_4(a_{12}y_1^s + a_{22}y_2^s)],$$

$$Y_3 = \frac{2}{N_v} \mu_1(t - \tau_{1t}^k) \mu_2(t - \tau_{2t}^k) (\hat{\lambda}_1\hat{\lambda}_3 + \hat{\lambda}_2\hat{\lambda}_4)(a_{11}a_{12} + a_{21}a_{22}).$$

Путем взятия соответствующих частных производных от (20) по (11), (12) могут быть найдены необходимые оценки непрерывных параметров  $\hat{\Lambda}_t$ . Полученный алгоритм оценки дискретно-непрерывных параметров  $\hat{\Lambda}_t$  может рассматриваться как обобщение задачи поляриметрии на случай смешивания мгновенных состояний поляризационных параметров.

Для окончательного решения поставленной задачи синтеза алгоритма оптимального приема двух ортогонально поляризованных сигналов на одной частоте со смешанными мгновенными состояниями поляризационных параметров необходимо воспользоваться уравнением оценки дискретного параметра

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(t = t_k) = \max^{-1}\{p_i(t_{k+1} - 0)\}, \quad (21)$$

где  $\max^{-1}\{\Phi(i)\}$  — функция, обратная  $\max\{\Phi(i)\}$ .

В предположении высокой апостериорной точности фильтрации непрерывного параметра  $\hat{\Lambda}_{it}$  (11) и монотонности экспоненциальной функции (21) приводится к виду:

$$\hat{\theta}_k = \max_i^{-1} \left\{ \int_{t_k}^{t_{k+1}} F_i(\hat{\Lambda}_t, \tau) d\tau + \ln p(t_k + 0, i/\hat{\Lambda}_t) \right\}, \quad (22)$$

где  $F_i(\cdot)$  и  $p(\cdot)$  определяются из решения (19) и (13).

Важным достоинством этого метода синтеза является то, что это решение не приводит к вырожденности при противоположных сигналах, как это было бы с использованием апостериорной плотности вероятностей

$$p_i(t) = \sum_{j=1}^n p_j(t) Q_{ji}(t). \quad (23)$$

В результате в обратном полукольце протокола генерации ключей, который сейчас реализуется всеми разработчиками как открытый и, чаще всего, на технологии неэкранированной «витой пары», при замене на канал с управляемой поляризацией, действующий по предлагаемому методу, возникает код, который имеет практически такую же статистику, как и квантовый, то есть близким к статистике случайных процессов.

#### ОЦЕНКА КРИПТОУСТОЙЧИВОСТИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ С ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ КАНАЛАМИ

Любой шифр, в принципе, может быть раскрыт перебором. Криптографическая стойкость зашифрованного сообщения характеризуется трудоемкостью перебора (точнее, энтропией множества ключей). Критерием успеха при переборе служит появление смысла (что формально означает прирост апостериорной вероятности сообщения при данной криптограмме) [7].

Непрерывным сообщениям присуще свойство, которое можно назвать «семантическим порогом»: отрезок колебания  $x(t)$  начинает приобретать семантическую окраску (смысл) для получателя лишь после того, как его длительность превысит некоторую критическую величину  $T_{кр}$  (как правило, на порядки превосходящую интервал дискретизации  $\Delta t$ ). С учетом сказанного восстановление без ключа перемешанного непрерывного сообщения мыслимо в виде следующей процедуры. Запомненная последовательность разбивается на серии по  $mN$  отсчетов в каждой ( $m = T_{кр} / T$ ); внутри серии производится разбиение на блоки по  $N$  отсчетов.

Заметим, что ни сам способ защиты, ни его параметры, согласно современным воззрениям, не могут быть и не должны быть секретными [8]. Единственным секретом, обеспечивающим защиту, является ключ, используемый в данном сеансе связи. К каждому блоку внутри серии поочередно применяется одна из  $N!$  перестановок, после чего синтезируется ряд для  $m$  подряд идущих сегментов (то есть серии отсчетов), и полученное колебание  $y_{mT}(t)$  тестируется на «осмысленность». Перебор перестановок для данной серии заканчивается, если очередная попытка привела к уверенному отождествлению результата синтеза с одним из

«осмысленных» сообщений. Общее число переборov внутри серии конечно и равно  $(N!)^m$ . Каждая попытка отождествления предполагает синтез ряда в реальном времени (иначе возникают проблемы с критерием «осмысленности»), поэтому число  $K = (N!)^m$  есть коэффициент растяжения временной оси: сообщение длительностью  $T_c$  секунд с вероятностью 1 может быть восстановлено без ключа лишь спустя время  $KT_c$ .

Уже при малых  $T$  число  $K$  очень велико. Пусть, например, сообщение дискретизируется с частотой 10 кГц, и перемешиванию подвергаются блоки из  $N = 5$  отсчетов. Предположим,  $T_{кр} = 0,1$  с (это близко к средней длительности фонем), тогда  $K > 10^{400}$ . Перебирать перестановки на каждом сегменте  $T$  придется лишь для полностью случайной последовательности подстановок, когда энтропия этой последовательности растет линейно с ее длиной. Если же последовательность подстановок псевдослучайна, то перебирать надо не отдельные перестановки, а сразу их последовательности для  $m$  подряд идущих сегментов. Объем перебора при этом резко падает (на сотни порядков) и полностью определяется используемым методом имитации случайности в конечных полях.

Для сигналов, кодированных при помощи  $M$ -последовательностей при  $N \geq 5$ ,  $n \geq 16$  мощность множества с энтропией 80 бит ( $N \times n$ ) такова, что для полного его перебора процессору с быстродействием миллиард операций в секунду потребуется более  $3 \times 10^7$  лет. Для систем, работающих на алгоритмах смешивания поляризационных состояний, энтропия ключей рассчитывается по формуле  $H\{Z\} = (K \times L \times N \times n)$ , тогда время расшифровывания для этих систем  $T_{расш} > 3 \times 10^8$  лет (при скорости обработки  $V_{обр} = 10^9$  оп./с), где  $K$  — количество вариантов таблицы совпадения,  $L$  — количество поляризованных каналов, что на порядок выше.

На рисунке 1 приведен расчет времени, требуемого на криптоанализ перехваченных кодов при различных алгоритмах защиты. Цифрами обозначены: 1 — одноканальные системы с шифрацией сигнала при помощи псевдослучайных сигналов; 2 — двухканальные системы с ортогональной поляризацией и асинхронным методом коммутации каналов; 3 — трехканальные системы с маскирующим каналом, ортогональной поляризацией информационных каналов и синхронным методом коммутации; 4 — трехканальные системы с неортогональной поляризацией информационных каналов и асинхронным методом коммутации.

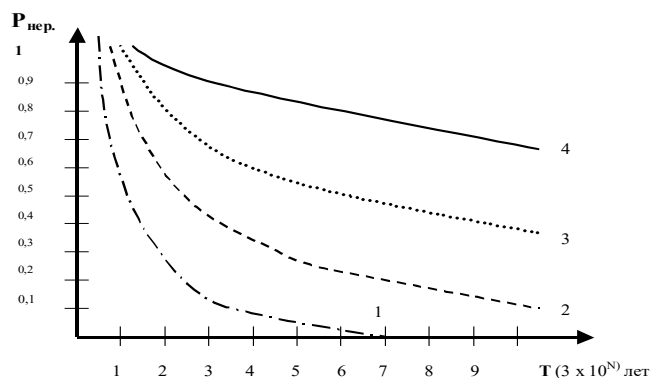


Рис. 1. Структурная скрытность кода

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предлагаемый квантовый протокол позволяет получить маскировку «нулей» передаваемого кода и неинформационное значение «единиц», которая может позволить скрыть все параметры модели OSI при передаче информации и тем самым заменить традиционные подходы к защите от сетевых атак.

Кроме того, можно получить смешивание поляризационных параметров, приводящее к повышению общей скрытности передачи и решению насущных проблем защиты информации в вычислительных сетях. К тому же состояние линейной поляризации при отказе от использования ортогональных значений и переходе к прямому измерению текущего состояния (направления в пространстве) позволяет использовать коды с произвольным основанием или увеличивать пропускную способность за счет квантовых методов сжатия.

## ЛИТЕРАТУРА

- Нильсен, М. А. Квантовые вычисления и квантовая информация = Quantum Computational and Quantum Information / М. А. Нильсен, И. Л. Чанг; Пер. с англ. под ред. М. Н. Вялого и П. М. Островского. — Москва: Мир. Редакция литературы по информатике и новой технике, 2006. — 824 с.
- Аджемов, С. С. Прием обыкновенной и необыкновенной волн антенной решеткой с управляемой поляризационной характеристикой / С. С. Аджемов, В. Н. Репинский // Радиотехника и электроника, 2019. Т. 64, № 5. С. 455–461. DOI: 10.1134/S0033849419050012.
- Старшинова, Е. И. Результаты разработки ферритовых фазовращателей для ФАР различных диапазонов / Е. И. Старшинова, Д. В. Черников // Радиолокационные системы специального и гражданского назначения. 2010–2012: Сборник статей / Под ред. Ю. И. Белого. — Москва: Радиотехника, 2011. — С. 493–502.
- Белотелов, В. И. Как управлять светом с помощью магнитного поля // Квант. 2010. № 1. С.12–17.
- Гусев, К. Г. Поляризационная модуляция / К. Г. Гусев, А. Д. Филатов, А. П. Сополев. — Москва: Советское радио. Редакция литературы по вопросам космической радиоэлектронике, 1974. — 288 с.
- Родимов, А. П. Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов и помех в линиях связи / А. П. Родимов, В. В. Поповский. — Москва: Радио и связь. Редакция литературы по радиотехнике, 1984. — 272 с. — (Статистическая теория связи; вып. 21).
- Merkle, R. C. Secure Communications Over Insecure Channels // Communications of the ACM. 1978. Vol. 21, No. 4. Pp. 294–299. DOI: 10.1145/359460.359473.
- Shor, P. W. Simple Proof of Security of the BB84 Quantum Key Distribution Protocol / P. W. Shor, J. Preskill // Physical Review Letters. 2000. Vol. 85, Is. 2. P. 441, 4 p. Published online at July 10, 2000. DOI: 10.1103/PhysRevLett.85.441

# Upgrading the Quantum Key-Generating Protocol to Eliminate the Problem of Open Semi-Ring

Grand PhD E. G. Vorobiev, D. E. Vorobieva  
Saint Petersburg Electrotechnical University  
Saint Petersburg, Russia  
vrbyug@mail.ru

**Abstract.** The method of synthesis of quantum protocols based on controlled states of polarization is proposed. It is possible to create domestic quantum protocols, which do not use an open communication sub-channel for the implementation of the agreement. The intrusion of an attacker into this open sub-channel can lead to the inoperability of the entire protocol. In the proposed method, the transmitted code is statistically approaching random, as in a quantum sub channel. The purpose of the synthesis should be a signal in the transmission channel, for which the Shannon criterion for theoretically undisclosed cipher performed - a probability of 0.5 for correct recognition of the state of the information bit. Analysis of the transmitted information becomes impossible, as zeros and units in the transmission are not informational; they only mean a coincidence or mismatch of the state of the bit of transmitted information and the control process. The task of synthesis of the algorithm of optimal reception of two orthogonally polarized signals at the same frequency with mixed instant states of polarizing parameters based on the equation of the evaluation of discrete parameter has been set and solved.

**Keywords:** quantum cryptography, controlled polarization, pseudo-case, quantum protocol, information transfer.

## REFERENCES

1. Nielsen M. A., Chuang I. L. Quantum Computation and Quantum Information [Kvantovye vychisleniya i kvantovaya informatsiya]. Moscow, Mir Publishers, 2006, 824 p.
2. Adzhemov S. S., Repinskii V. N. Detection of Ordinary and Extraordinary Waves Using an Antenna Array with Controlled Polarization Characteristic [Priem obyknovennoy i neobyknovennoy voln antennoy reshetkoy s upravlyaemoy polarizatsionnoy kharakteristikoy], *Journal of Communications Technology and Electronics [Radiotekhnika i elektronika]*, 2019, Vol. 64, No. 5, Pp. 471–476. DOI: 10.1134/S1064226919050012.
3. Starshinova E. I., Chernikin D. V. Results of the Development of Ferrite Phase Shifters for Phased Array Antennas of Various Ranges [Rezultaty razrabotki ferritovykh fazovrashchateley dlya FAR razlichnykh diapazonov], *Radar Systems for Special and Civil Purposes. 2010-2012: Collected Papers [Radiolokatsionnye sistemy spetsial'nogo i grazhdanskogo naznacheniya. 2010–2012: Sbornik statey]*. Moscow, Radio Engineering, 2011, Pp. 493–502.
4. Belotelov V. I. How to Control Light with a Magnetic Field [Kak upravlyat' svetom s pomoshch'yu magnitnogo polya], *Kvant [Kvant]*. 2010, No. 1, Pp. 12–17.
5. Gusev K. G., Filatov A. D., Sopolev A. P. Polarizing modulation [Polyarizatsionnaya modulyatsiya]. Moscow, Soviet Radio, 1974, 288 p.
6. Rodimov A. P., Popovsky V. V. Statistical theory of polarizing-temporal processing of signals and interference in communication lines [Statisticheskaya teoriya polarizatsionno-vremennoy obrabotki signalov i pomekh v liniyakh svyazi]. Moscow, Radio and Communications, 1984, 272 p.
7. Merkle R. C. Secure Communications Over Insecure Channels, *Communications of the ACM*, 1978, Vol. 21, No. 4, Pp. 294–299. DOI: 10.1145/359460.359473.
8. Shor P. W., Preskill J. Simple Proof of Security of the BB84 Quantum Key Distribution Protocol, *Physical Review Letters*, 2000, Vol. 85, Is. 2, P. 441, 4 p. Published online at July 10, 2000. DOI: 10.1103/PhysRevLett.85.441.

# Анализ однородности показателей ускоренных испытаний

к.т.н. В. В. Гарбарук

Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I,  
Санкт-Петербург, Россия  
vvgarbaruk@mail.ru

Н. В. Груздев

ООО «СвязьСтройСервис»  
Санкт-Петербург, Россия  
Nik\_gru@mail.ru

**Аннотация.** Без сокращения времени наблюдения за работой надежной продукции высоких технологий не возможен анализ их качества. Рассмотрено важное направление обработки результатов ускоренных испытаний: проверка гипотезы наличия статистических различий двух усеченных выборок. Предполагаются испытания  $N$  однотипных изделий, которые, в целях сокращения времени наблюдения, продолжают в течение заданного времени  $t$  или до получения заданного числа отказов  $n$ . Продолжительность безотказной работы каждого прибора фиксируется. Отказавшие изделия не восстанавливаются. Показано применение критерия Смирнова для сравнения эмпирических функций распределения двух ограниченных выборок. Приведен пример расчета, демонстрирующий сокращение времени получения информации о надежности испытываемой продукции.

**Ключевые слова:** ускоренные испытания, временные ряды, однородность статистического материала, критерий Смирнова.

## ВВЕДЕНИЕ

Стендовые и лабораторные испытания надежных и дорогостоящих изделий широко применяют для определения показателей их надежности [1, 2]. Анализ безотказности схож с задачами предсказания продолжительности жизни, которые рассматриваются не только в науке и технике, но и в медицине, биологии и т. п. В медицине, например, прогноз времени жизни пациентов определяет необходимость оперативного вмешательства. Долговечность современных приборов может достигать сотен тысяч часов, испытания их надежности прекращаются по истечении времени, далекого от максимальной наработки.

Проведение испытаний на надежность (активных или пассивных) связано со значительными затратами времени и средств. В технике получили развитие ускоренные испытания на надежность, в которых сокращаются сроки получения корректной информации о безотказности продукции [3, 4]. Часто ускоренные испытания проводят в форсированном режиме, существенно повышая, например, температуру, то есть изменяя условия эксплуатации оборудования. При этом основное внимание уделяется разработке непараметрических методов анализа, которые не предполагают знания законов распределения наработок до отказа изделий [5, 6].

Исследованию временных рядов, характеризующих время безотказной работы надежных приборов, посвящены многие статьи [7, 8]. В данной работе рассматриваются испытания  $N$  однотипных изделий, которые, в целях сокращения времени наблюдения, продолжают в течение заданного времени  $t$  или до получения заданного числа отказов  $n$ .

Продолжительность  $t_k$  безотказной работы каждого прибора фиксируется. Отказавшие изделия не восстанавливаются.

В результате получается выборка значений объема  $n$

$$t_1 < t_2 < \dots < t_n, n \leq N$$

которая характеризует длительность безотказной работы данного типа изделия.

Отметим, что переменная  $t$  может означать не только продолжительность работы до отказа испытываемого прибора, выражаемой в часах работы, но и календарное время, количество рабочих циклов и т. п.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На основании усеченной сверху выборки надо оценить показатели надежности прибора, например, среднее время наработки на отказ данной партии приборов. Эта задача, называемая в математической статистике оценкой параметров закона распределения по усеченной выборке, имеет хорошо разработанную теорию [9, 10]. Более сложной задачей является проверка гипотез по неполной выборке. Рассмотрим задачу проверки однородности статистического материала, то есть проверку гипотезы о принадлежности одной генеральной совокупности двух независимых выборок. Пусть имеются два усеченных вариационных ряда размеров  $x_1 < x_2 < \dots < x_n$  и  $y_1 < y_2 < \dots < y_m$  объемом  $n$  и  $m$  соответственно, полученных при ограничении времени проверки надежности. Для определенности примем, что  $n \leq m$ . Подобные выборки могут соответствовать, например, двум различным способам производства одного и того же изделия. Требуется проверить нулевую гипотезу  $H_0$ , согласно которой разницы между двумя способами производства нет, что математически соответствует равенству функций распределения двух случайных величин, которым соответствуют рассматриваемые выборки.

## КРИТЕРИЙ СМИРНОВА

В случае полных выборок проблема проверки гипотезы однородности имеет окончательное решение почти для всех интересующих практику случаев [11, 12]. Для усеченных выборок в некоторых случаях может быть применен критерий Смирнова [13, 14], по которому при заданных эмпирических функциях распределения двух выборок  $F_n^*$  и  $G_m^*$  и устанавливается справедливость гипотезы о тождественности законов распределений, то есть проверяется нулевая гипотеза  $H_0: F_n^* = G_m^*$ . Альтернативной (конкурирующей) гипотезой  $H_1$  выберем  $F_n^* \neq G_m^*$ . За меру расхождения функций  $F_n^*$  и  $G_m^*$  принимается величина

$$D_{n,m} = \max_t |F_n^* - G_m^*|,$$

которая определяется непосредственным вычислением разностей  $x_i$  и  $y_i$  или графически по графикам ступенчатых функций  $F_n^*$  и  $G_m^*$ . Доказано [15], что

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left( \sqrt{\frac{n \cdot m}{n+m}} \cdot D_{n,m} | H_0 < z \right) = K(z),$$

где  $K(z)$  — функция Колмогорова.

Пусть при выбранном уровне значимости  $\alpha$  известно критическое значение  $\lambda_{кр}$ . Если величина

$$\lambda_{набл} = \sqrt{\frac{n \cdot m}{n+m}} \cdot D_{n,m}$$

достигает значения  $\lambda_{кр}$  или превосходит его, то существует значимое расхождение между функциями распределения  $F_n^*$  и  $G_m^*$ . Тогда гипотеза  $H_0$  отклоняется с вероятностью ошибки  $\alpha$ .

Применим данный критерий для усеченных выборок. Положим  $t_0 = \min(x_n, y_m)$ . Возможность использования критерия Смирнова основана на том, что величина  $\lambda_{набл}$ , рассчитанная по наибольшей разности между эмпирическими функциями распределения  $F_n^*$  и  $G_m^*$  может превысить критическое значение  $\lambda_{кр}$  раньше достижения  $t_0$ . В этом случае

$$D_{n,m} = \max_t |F_n^* - G_m^*| \geq \max_{t \leq t_0} |F_n^* - G_m^*| \geq \sqrt{\frac{n+m}{n \cdot m}} \cdot \lambda_{кр}.$$

Нулевая гипотеза  $F_n^* = G_m^*$  отклоняется вне зависимости от неизвестных из-за усеченности выборки значений, которые получаются при  $t > t_0$ .

ПРИМЕР ПРОВЕРКИ ОДНОРОДНОСТИ

В качестве примера сравним две усеченные выборки, в каждой из которых даны моменты выхода из строя двух типов реле [16]. Первая выборка объемом 110 реле испытывалась в течении 10 000 ч., при этом из строя вышли 6 реле. Вторая выборка объемом 120 реле испытывалась в течении 16 000 ч., при этом из строя вышло 41 реле. Если нулевая гипотеза о принадлежности данных выборок одной генеральной совокупности верна, то время возможного отказа не зависит от типа реле.

В данном примере  $t_0 = \min(10000, 16000) = 10\ 000$  ч. Разобьем промежутки  $[0, 10000]$  на 5 частей (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение функций  $F_n^*$  и  $G_m^*$

Интервалы времени, ч	0–2 000	2 000–4 000	4 000–6 000	6 000–8 000	8 000–10 000
Число отказов	1	0	0	3	2
Накопленное число отказов	1	1	1	4	6
Относительная частота	0,009	0,009	0,009	0,036	0,055
Число отказов	1	6	9	17	8
Накопленное число отказов	1	7	16	33	41
Относительная частота	0,008	0,059	0,134	0,277	0,345
$ F_n^* - G_m^* $	0,001	0,050	0,125	0,241	0,290

Вторая, третья и четвертая строки относятся к первой выборке. Во второй строке записано количество реле, отказавших в данном временном интервале; в третьей строке — общее число отказов к моменту окончания соответствующего интервала; в четвертой строке — относительная частота отказов. Для второй выборки аналогично заполнены пятая, шестая и седьмая строки. В последней строке записаны разности между эмпирическими функциями распределения  $|F_n^* - G_m^*|$  наибольшая из которых равна 0,29. В таблице 2 приведены критические значения  $\lambda_{кр}$  для различных уровней значимости  $\alpha$  [17].

Таблица 2

Критические значения  $\lambda_{кр}$

$\alpha$	0,1	0,05	0,01
$\lambda_{кр}$	1,224	1,358	1,628

Видно, что при всех указанных значениях  $\alpha$  выполняется неравенство  $\lambda_{набл} > \lambda_{кр}$ . Гипотеза о равенстве законов распределений двух выборок отвергается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Различие между выборками оказалось значимым уже до момента времени, равного 10 000 часов. Если бы нас интересовал только этот вопрос, то дальнейшие испытания можно было бы прекратить. В результате были бы уменьшены как ресурсы, так и время получения информации о надежности испытываемой продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nelson, W. B. Accelerated Testing Statistical Models, Test Plans and Data Analysis. — New Jersey: Wiley-Interscience, 2004. — 624 p. — (Wiley Series in Probability and Statistics).
2. Мехоношин, В. С. Надежность технических систем и техногенный риск: Учебное пособие для курсантов и студентов ФБФО специализации 330502 / В. С. Мехоношин, М-во транспорта РФ, Ульяновское высш. авиац. училище гражд. авиации. — Ульяновск: УВАУ ГА, 2005. — 90 с.
3. Гербин, А. И. Использование ускоренных методов оценки показателей надежности изделий ЭКБ отечественного производства — один из путей повышения их коммерческой привлекательности // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 9 (190). С. 136–140. DOI: 10.22184/1992-4178.2019.190.9.136.140.
4. Никулин, М. С. О развитии и внедрении методов статистики ускоренных испытаний для анализа безопасности, надежности и качества продукции высоких технологий / М. С. Никулин, М. В. Сильников, К. А. Дубаренко // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2014. № 1 (190). С. 217–223.
5. Тимонин, В. И. Сравнение прогрессивно цензурированных выборок — численные методы табулирования распределений статистик однородности и исследование оценки параметров связи их распределений методом Монте-Карло / В. И. Тимонин, Н. Д. Тяникова // Математическое моделирование и численные методы. 2015. № 3. С. 89–100. DOI: 10.18698/2309-3684-2015-3-89100.
6. Чимитова, Е. В. Непараметрические критерии согласия в задачах проверки адекватности моделей надежности по цензурированным данным / Е. В. Чимитова, М. А. Ве-

дерникова, Н. С. Галанова // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. № 4 (25). С. 115–124.

7. Ковальчук, В. В. Оценка показателей надежности испытаний при экспоненциальном законе распределения отказов / В. В. Ковальчук, М. С. Бурзун // Исследования молодых ученых: материалы XII Международной научной конференции (Казань, июль 2020 г.). — Казань: Молодой ученый, 2020. — С. 15–18.

8. Русин, А. Ю. Статистические обработки результатов наблюдений при проведении ускоренных испытаний на надежность / А. Ю. Русин, М. А. Н. Абдулхамед // Молодой ученый. 2014. № 18 (77). С. 274–279.

9. Ефимов, А. Н. Порядковые статистики — их свойства и приложения. — Москва: Знание, 1980. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике).

10. David, H. A. Order statistics. Second Edition. — New York: Wiley-Interscience, 1981. — 384 p. — (Wiley Series in Probability and Statistics).

11. Statistical Methods in Experimental Physics / W. T. Eadie, D. Drijard, F. E. James, [et al.]. — Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1971. — 308 p.

12. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. — 3-е изд., стер. — Москва: Наука, 1969. — 511 с.

13. Антонов, А. В. Статистические модели в теории надежности: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Информатика и вычислительная техника» специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления» / А. В. Антонов, М. С. Никулин. — Москва: Абрис: Высшая школа, 2012. — 390 с.

14. Боровков А. А. Математическая статистика. Дополнительные главы: Учебное пособие для вузов. — Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. — 144 с.

15. Большев, Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. — 3-е изд. — Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. — 416 с.

16. Гарбарук, В. В. Проверка однородности статистического материала по результатам ускоренных испытаний / В. В. Гарбарук, М. А. Пирожков // Герметизированные магнитоуправляемые контакты (герконы): Межвуз. сб. научн. тр. / Рязан. радиотехн. ин-т; [Редкол.: А. С. Арефьев и др.]. — Рязань: РРТИ, 1982. — С. 136–141.

17. Заляжных, В. В. Статистические расчеты при планировании и обработке результатов испытаний: Учебное пособие / В. В. Заляжных; Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова. — Архангельск: САФУ, 2014. — 83 с.

# Analysis of the Uniformity of Accelerated Testing Indicators

PhD V. V. Garbaruk

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University  
Saint Petersburg, Russia  
vvgarbaruk@mail.ru

N. V. Gruzdev

SvyazStroyService LLC  
Saint Petersburg, Russia  
Nik\_gru@mail.ru

**Abstract.** Without reducing the time for monitoring the operation of reliable high-tech products, it is not possible to analyze their quality. An important area of processing the results of accelerated tests is considered: testing the hypothesis of statistical differences between two truncated samples. An important direction of processing the results of accelerated tests is considered: testing the hypothesis of the presence of statistical differences between two truncated samples. Tests of  $N$  similar products are assumed, which, in order to reduce the observation time, continue for a given time  $t$  or until a given number of failures  $n$  is obtained. The uptime of each device is recorded. Products that have failed will not be restored. The application of the Smirnov criterion to compare the empirical distribution functions of two bounded samples is shown. An example of calculation is given that demonstrates a reduction in the time for obtaining information about the reliability of the tested products.

**Keywords:** accelerated testing, time series, statistical homogeneity of the material, the Smirnov criterion.

## REFERENCES

1. Nelson W. B. Accelerated Testing Statistical Models, Test Plans and Data Analysis. New Jersey, Wiley-Interscience, 2004, 624 p.
2. Mekhonoshin V. S. Reliability of technical systems and technogenic risk: Study guide [Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogenny risk: Uchebnoe posobie]. Ulyanovsk, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, 2005, 90 p.
3. Herbin A. I. The Use of Accelerated Methods for Assessing the Reliability Indicators of Domestic Electronic Components is One of the Ways to Increase Their Commercial Attractiveness [Ispol'zovanie uskorennykh metodov otsenki pokazateley nadezhnosti izdeliy EKB otechestvennogo proizvodstva — odin iz putey povysheniya ikh kommercheskoy privlekatel'nosti], *Electronics: Science, Technology, Business [Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes]*, 2019, No. 9 (190), Pp. 136–140. DOI: 10.22184/1992-4178.2019.190.9.136.140.
4. Nikulin M. S., Silnikov M. V., Dubarenko K. A. On the Development and Implementation Methods of Statistics of Accelerated Tests for Safety Analysis, Reliability and Quality of Products of High Technologies [O razviti i vnedrenii metodov statistiki uskorennykh ispytaniy dlya analiza bezopasnosti, nadezhnosti i kachestva produktsii vysokikh tekhnologiy], *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Sciences And Technology [Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta]*, 2014, No. 1 (190), Pp. 217–223.
5. Timonin V. I., Tyannikova N. D. Comparison of Progressively Censored Samples — Numerical Methods for Tabulating of Homogeneity Statistics and Study of Estimation of Relation Parameters of Their Distribution by Monte Carlo Method [Sravnenie progressivno tsenzurovannykh vyborok — chislennyye metody tabulirovaniya raspredeleniy statistik odnorodnosti i issledovanie otsenki parametrov svyazi ikh raspredeleniy metodom Monte-Karlo], *Mathematical Modeling and Computational Methods [Matematicheskoe modelirovanie i chislennyye metody]*, 2015, No. 3, Pp. 89–100. DOI: 10.18698/2309-3684-2015-3-89100.
6. Chimitova E. V., Vedernikova M. A., Galanova N. S. Nonparametric Goodness-Of-Fit Tests in Testing Adequacy of Reliability Models for Right Censored Data. [Neparametricheskie kriterii soglasiya v zadachakh proverki adekvatnosti modely nadezhnosti po tsenzurovannym dannym], *Tomsk State University Journal of Control and Computer Science [Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika]*, 2013, No. 4 (25). Pp. 115–124.
7. Kovalchuk V. V., Burzun M. S. Evaluation of Test Reliability Indicators with an Exponential Law of Failure Distribution [Otsenka pokazateley nadezhnosti ispytaniy pri eksponential'nom zakone raspredeleniya otkazov], *Research of Young Scientists: Materials of the XII International Scientific Conference [Issledovaniya molodykh uchenykh: materialy XII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii] (Kazan, Russia, July, 2020)*, Kazan: Young Scientist, 2020, Pp. 15–18.
8. Rusin A. Yu., Abdulkhamed M. A. N. Static Processing of Observation Results During Accelerated Reliability Tests [Staticheskoe obrabotki rezul'tatov nablyudeniya pri provedenii uskorennykh ispytaniy na nadezhnost'], *Young Scientist [Molodoy uchenyy]*, 2014, No. 18 (77), Pp. 274–279.
9. Efimov A. N. Ordinal statistics — their properties and applications [Poryadkovyye statistiki — ikh svoystva i prilozheniya]. Moscow, Znanie Publishers, 1980, 64 p.
10. David H. A. Order statistics. Second Edition. New York, Wiley-Interscience, 1981, 384 p.
11. Eadie W. T., Drijard D., James F. E., et al. Statistical Methods in Experimental Physics. Amsterdam, North-Holland Publishing Company, 1971, 308 p.
12. Smirnov N. V., Dunin-Barkovsky I. V. Course of probability theory and mathematical statistics for technical applications [Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki dlya tekhnicheskikh prilozheniy]. Moscow, Nauka Publishers, 1969, 511 p.
13. Antonov A. V., Nikulin M. S. Statistical models in reliability theory: Study guide [Staticheskyye modeli v teorii nadezhnosti: Uchebnoe posobie]. Moscow, Abris, Vysshaya shkola Publishing House, 2012, 390 p.
14. Borovkov A. A. Mathematical statistics. Additional chapters: Study guide for universities [Matematicheskaya statistika. Dopolnitel'nye glavy: Uchebnoe posobie dlya vuzov]. Moscow, Nauka Publishers, 1984, 144 p.

15. Bol'shev L. N., Smirnov N. V. Tables of mathematical statistics [Tablitsy matematicheskoy statistiki]. Moscow, Nauka Publishers, 1983, 416 p.

16. Garbaruk V. V., Pirozhkov M. A. Checking of Homogeneity of Statistical Material on the Results of Accelerated Tests [Proverka odnorodnosti statisticheskogo materiala po rezul'tatam uskorennykh ispytaniy], *Sealed Magnetically Operated Contacts (Reed Switches): Interuniversity Collection of*

*Scientific Papers [Germetizirovannye magnitopravlyayemye kontakty (gerkony): Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov]*. Ryazan, Ryazan Radio Engineering Institute, 1982, Pp. 136–141.

17. Zalyazhnykh V. V. Statistical calculations in the planning and processing of test results: Study guide [Statisticheskie raschety pri planirovanii i obrabotke rezul'tatov ispytaniy: Uchebnoe posobie]. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, 2014, 83 p.

# Анализ моделей и новых подходов к оценке качества образования

С. В. Кирюшкин

Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I  
Санкт-Петербург, Россия  
stasvkir@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассмотрены модели оценки качества образования, применяемые в России, Европе и США. Приводится анализ новых перспективных подходов к оценке качества образования. Технология моделирования образовательного процесса использует эвристические, балльно-рейтинговые и имитационные модели. Новые подходы к оценке качества образования включают методы когнитивного моделирования.

**Ключевые слова:** качество образования, модели, когнитивное моделирование.

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема оценки качества высшего образования приобретает особое значение в условиях пандемии коронавируса (COVID-19).

На ноябрь 2020 года пандемией COVID-19 затронуты более полутора миллиардов обучающихся в 191 стране мира [1], что составляет более 90 % всех учащихся в мире.

Одной из первостепенных задач в сфере образования становится своевременный анализ актуальной ситуации, принятие наиболее адекватных мер, учитывающих специфику конкретной страны, и поддержка всех участников образовательной системы: учащихся, их родителей, педагогов и администрации на всех уровнях.

Исследование Международного института образования выявило определенные тренды развития высшего образования в период пандемии. В связи с кризисом многие студенты испытывают следующие сложности: общий стресс, связанный с пандемией; финансовые затруднения; социальную изоляцию; отсутствие возможности коммуникации с однокурсниками; отсутствие надежного интернет-соединения; отсутствие оборудования, необходимого для онлайн-обучения; поддержание режима дня.

Для преодоления новых проблем в системе высшего образования ЮНЕСКО рекомендует принять следующие меры: продолжить разработку эффективных методов онлайн-обучения для обеспечения качества и равенства в образовании; разработать тренинги для студентов и преподавателей по использованию цифровых инструментов обучения; задокументировать все изменения в организации процесса обучения, произошедшие в период пандемии; использовать опыт и ошибки при организации онлайн-образования; пересмотреть и обновить систему обучения и преподавания [2].

## АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ

*Государственная оценка* (аккредитация) — это установление или подтверждение государственного статуса образовательного учреждения по типу (высшее учебное

заведение) и по виду (институт, академия, университет), уровня реализуемых образовательных программ и их направленности, а также соответствия содержания и качества подготовки выпускников образовательных учреждений федеральным государственным образовательным стандартам или федеральным государственным требованиям.

Министерство науки и высшего образования РФ проводит постоянный мониторинг системы образования (оценку эффективности вузов) для представления органам государственной власти и гражданам Российской Федерации объективной информации о состоянии системы образования и ежегодно представляет отчет в Правительство Российской Федерации [3–5]. Отчеты о состоянии региональных и муниципальных систем образования публикуются в сети Интернет и находятся в свободном доступе для граждан.

Независимая оценка качества образования представляет собой оценочную процедуру на основе сведений об образовательной деятельности организаций, осуществляющих образовательную деятельность. Независимая оценка качества образования представлена внешней и внутренней оценкой.

*Внешняя оценка* проводится общественными экспертами (общественная аккредитация, в том числе профессионально-общественная и международная аккредитация).

*Внутренняя оценка* проводится непосредственно самим вузом, причем каждая образовательная организация имеет свою внутреннюю систему качества образования.

Задачи внутренней независимой оценки:

- совершенствование структуры и актуализация содержания образовательных программ, реализуемых в образовательной организации;
- совершенствование ресурсного обеспечения образовательного процесса;
- повышение компетентности и уровня квалификации педагогических работников, участвующих в реализации образовательных программ;
- повышение мотивации обучающихся к успешному освоению образовательных программ;
- усиление взаимодействия образовательной организации с социальными партнерами-работодателями по вопросам совершенствования подготовки обучающихся;
- противодействие коррупции в ходе реализации образовательного процесса.

Высшие учебные заведения встраивают элементы «независимости» в существующие формы и процедуры контроля качества образования. Значимым элементом системы внутренней независимой оценки качества образования

является удовлетворенность обучающихся и их непосредственное участие в оценке качества образования.

В мировой практике применяются различные подходы к оценке качества работы вузов [6–8]. Исторически сформировались «английская» модель, в основе которой лежит внутренняя самооценка вузовского академического сообщества, и «французская», или континентальная модель, основанная на внешней оценке вуза с точки зрения его ответственности перед обществом и государством.

В основе «английской» модели лежит внутренняя самооценка вузовского академического сообщества. Она функционирует в Великобритании, Германии, США.

«Французская» модель основана на внешней оценке вуза с точки зрения его ответственности перед обществом и государством посредством аттестации, аккредитации, инспекции. Самооценке вуза придается номинальное значение, так как основное внимание уделяется проведению независимой внешней оценки. Результаты университетских проверок и оценок широко публикуются и дают возможность не только государству, но и обществу судить об академическом уровне того или иного высшего учебного заведения. «Французская» модель используется в скандинавских странах, Чехии, Латвии, Эстонии и других странах, где государственные органы формулируют цели оценки, определяют наиболее важные аспекты оценки, принимают решения в организации образовательного процесса.

Система самооценки университетов США наиболее развита. Это связано с тем, что, в отличие от стран, где образование регулируют государственные органы, американское высшее образование контролируется преимущественно самими учебными заведениями. Процедура аккредитации университетов осуществляется региональными ассоциациями университетов и колледжей. Например, основными требованиями к качеству подготовки специалистов в области техники и технологий в соответствии с ее критериями являются следующие:

- знание и понимание современных научно-технических, общественных и политических проблем;
- умение применять естественнонаучные, математические и инженерные знания на практике;
- умение применять навыки и изученные методы в инженерной практике;
- способность проектировать процессы или системы в соответствии с поставленными задачами;
- способность планировать и проводить эксперимент, фиксировать и интерпретировать данные;
- способность работать в коллективе по междисциплинарной тематике;
- способность эффективно взаимодействовать в коллективе;
- профессиональная и этическая ответственность;
- широкая эрудиция, достаточная для понимания глобальных социальных последствий инженерных решений;
- понимание необходимости и способность учиться постоянно.

В системе высшего образования России более развита внешняя оценка качества, ориентированная на стандарты и показатели эффективности. Основными элементами этой системы являются стандартизация и процедуры лицензирования, аттестации и аккредитации, а также комплексное

оценивание образовательных учреждений в целом и отдельных специальностей на основе рейтинговой системы. Все эти процедуры включают проведение внутренней проверки. Основой объективной оценки качества образования являются федеральные государственные образовательные стандарты и федеральные государственные требования, а также образовательные стандарты, устанавливаемые университетами.

В 2015 году были определены особенности независимой системы оценки качества (НСОК), нормативным основанием для которой стали положения ст. 95 Федерального закона «Об образовании в Российской Федерации» от 29.12.2012 № 273-ФЗ.

Следует отметить, что в Министерстве образования РФ разрабатывается концепция центров сертификации и профессиональной квалификации, принимающих совместно с работодателями экзамены у студентов колледжей и вузов уже после получения диплома в образовательном учреждении с целью независимой оценки профессиональной квалификации выпускников. Оценка будет проходить в формате экзамена и включать в себя проверку практических навыков, полученных во время обучения.

#### НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ

Приказом Рособрнадзора № 590, Минпросвещения РФ № 219 от 06.05.2019 утверждены «Методология и критерии оценки качества общего образования в общеобразовательных организациях на основе практики международных исследований качества подготовки обучающихся».

Выход на новый качественный уровень невозможен без повышения эффективности решения таких «традиционных» задач образования, как регулярное обновление и модернизация федеральных государственных образовательных стандартов, обеспечение соответствия уровня подготовки обучающихся действующим стандартам, развитие таланта обучающихся, обеспечение доступности качественного образования, преодоление любых форм неравенства, обусловленных социальными-экономическими, этнокультурными и другими факторами.

В настоящее время в Российской Федерации сложилась система оценки качества образования на федеральном уровне, включающая целый комплекс процедур оценки качества образования и государственной итоговой аттестации. Данный комплекс процедур направлен, в первую очередь, на систематическую диагностику состояния системы общего образования для принятия своевременных мер по устранению выявленных проблем и последующей оценки эффективности принятых мер для полноценного развития системы образования.

Анализ исследований, проводимых по направлению информатизации системы образования показал, что современные технические средства обучения и информационные технологии требуют новых подходов к оценке качества подготовки специалистов.

В основе этих подходов лежит технология моделирования образовательного процесса, среди которых применяются модели различного типа: эвристические, балльно-рейтинговые, имитационные [9].

Эвристические методы оценки качества образования основаны на регрессионном анализе данных о деятельности вуза. Для построения математической модели из всего

множества факторов, определяющих процесс образования, формируется система значимых показателей. К основным таким показателям можно отнести учебную работу, учебно-материальную базу, учебную литературу, квалификацию профессорско-преподавательского состава и другие. Модель качества образования в общем виде может быть представлена в виде уравнения линейной регрессии.

*Балльно-рейтинговая* модель управления качеством образовательного процесса представляет собой описание системы с помощью набора количественных показателей  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , которые дают представление об объекте в данный момент времени. Общий рейтинг объекта вычисляется по формуле:

$$R = a_0x_1 + a_1x_2 + \dots + a_{n-1}x_n,$$

где  $R$  — значение рейтинга;  $a_0, a_1, a_{n-1}$  — весовые коэффициенты каждого показателя, определяемые экспертным путем. Достоинством этой модели является простота и инвариантность по отношению к предметной области и позволяет рассчитать рейтинг каждой компоненты образовательного процесса.

*Нормативно-рейтинговая* модель управления качеством деятельности вуза применяется в случае, если определена система норм и/или определен эталонный уровень каждого показателя, характеризующего систему образования. Этот вид модели позволяет решать задачи управления качеством подготовки специалистов на уровне вуза и на уровне вышестоящей организации. Достоинством этой модели является возможность генерировать множество стратегий и выбирать наиболее оптимальную по заданному критерию качества.

*Матрица деловой оценки* специалистов — это метод создания системы управления качеством образования, в основе которого лежат методы формального и неформального моделирования. Для построения матрицы деловой оценки строится «эталонная» модель выпускника вуза, его профессиональных, социальных и коммуникативных компетенций, которая должна отражать уровень подготовки и требования к качеству подготовки специалиста для всех участников образовательного процесса.

Перспективным для оценки вузов является анализ общественного мнения в социальных сетях. Анализ факторов, влияющих на общественное мнение, позволяет выявить области наибольшей обеспокоенности студентов, показатели, определяющие выбор абитуриентами университета, повысить качество предоставляемых услуг [10].

Выявление общественного мнения включает в себя следующие этапы: выборка данных, очистка данных, обработка данных, принятие решения о руководящем воздействии. При анализе полученных данных решаются следующие задачи:

- выявление смысловой близости документов;
- выявление машинно-сформированных текстов;
- классификация текстовых фрагментов по тональности;
- частотный анализ кластеров.

Новым подходом к оценке качества образования является использование технологии когнитивного моделирования, позволяющей априорно предсказывать результаты возможных управленческих решений и осуществлять

выбор наиболее эффективного варианта их решения. Когнитивный анализ и моделирование являются принципиально новыми элементами в структуре методологий исследования слабоструктурированных систем, к которым относится система образования [11–13].

В общем случае методология когнитивного моделирования состоит из следующих этапов:

1. Выбор факторов, влияющих на процесс образования и определение целевого и управляющих факторов.
2. Определение характера влияния факторов.
3. Выявление связей между факторами и определение силы влияния и взаимовлияния факторов на основе механизма экспертных оценок;
4. Построение когнитивной карты;
5. Процесс динамического моделирования. Задаются начальные параметры факторов и оценивается распространение возмущений, а также значение целевого параметра.

Когнитивная карта может применяться для решения как прямой задачи (оценки реакции выхода на изменения факторов), так и обратной (определения необходимых изменений факторов для достижения желаемого результата).

В большинстве систем моделирования детерминированных когнитивных карт применяются два разных метода получения прогноза поведения модели: с суммированием приращений значений факторов и без суммирования.

Применение программных комплексов для исследования когнитивных моделей управления качеством образования позволяет повысить эффективность принятия оптимальных стратегий. Для анализа когнитивных моделей используется ряд коммерческих систем: «Ситуация», «Компас», «Канва», «Курс», «Игла» [14–18].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что в настоящее время в России существует несколько подходов к внедрению систем оценки качества образования на региональном и федеральном уровнях. Для интеграции РФ в международное научно-образовательное пространство решение данного вопроса должно быть системным.

Сложные и слабоструктурированные задачи, к которым относится задача управления качеством образования, могут быть формализованы путем применения методологии когнитивного моделирования для принятия оптимальных стратегий.

Проблема выбора факторов, влияющих на процесс образования и определения характера влияния между ними, остается сложной и спорной с точки зрения различных подходов. Количество выбранных факторов в различных моделях может достигать 60. Например, в работе [19] рассмотрены три сценария изменения выходного параметра  $R$  (качества обучения) для тринадцати факторов  $X_1, \dots, X_{13}$  при семи разных наборах коэффициентов силы влияния.

Однако в случае выбора факторов, которые не оказывают существенного влияния на поведение построенной модели получение обоснованных решений может быть ошибочным.

Верификация когнитивной карты (проверка гипотезы о функциональной структуре) заключается в получении на построенной когнитивной модели прогноза развития поведения модели и обоснования полученных результатов с учетом фактических данных.

Решение проблемы выбора факторов, влияющих на процесс образования, и обоснование связи между ними считается наиболее сложной и является целью дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. COVID-19 Impact on Education // Education: From Disruption to Recovery / UNESCO.  
URL: <http://en.unesco.org/covid19/educationresponse> (дата обращения: 17.12.2020).
2. Уроки «Стресс-теста»: вузы в условиях пандемии и после нее. Аналитический доклад / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. — июнь 2020. — 50 с.  
URL: [http://www.hse.ru/data/2020/07/06/1595281277/003\\_Доклад.pdf](http://www.hse.ru/data/2020/07/06/1595281277/003_Доклад.pdf) (дата обращения: 17.12.2020).
3. Об образовании в Российской Федерации: Федеральный закон от 29.12.2012 № 273-ФЗ: ред. от 08.12.2020 № 429-ФЗ: принят Государственной Думой 21 декабря 2012 года: одобрен Советом Федерации 26 декабря 2012 года.
4. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие образования»: Постановление Правительства Российской Федерации от 26.12.2017 № 1642: ред. от 31.12.2020 № 2424.
5. Об утверждении Порядка проведения самообследования образовательной организацией: Приказ Министерства образования и науки Российской Федерации от 14.06.2013 № 462: ред. от 14.12.2017 № 1218.
6. Губа, К. С. Оценка качества высшего образования: обзор международного опыта // Университетское управление: практика и анализ. 2019. Т. 23, № 3. С. 94–107.  
DOI: 10.15826/umpra.2019.03.022.
7. Заиченко, Н. А. Что мы оцениваем, когда оцениваем качество образования: проблемы разнообразия // Система оценки качества образования в Санкт-Петербурге в 2018 году / под ред. В. Н. Волкова, В. Е. Фрадкина. — Санкт-Петербург: ГБУ ДПО «СПбЦОКОиИТ», 2018. — С. 38–46.
8. Каменева, Е. А. Система оценки качества высшего образования: анализ мировой и российской практики / Е. А. Каменева, Л. В. Приходько // Менеджмент и бизнес-администрирование. 2018. № 4. С. 112–124.
9. Вартумян, А. А. Современные подходы к оценке качества образования: модели и алгоритмы / А. А. Вартумян, И. С. Клименко // Новые технологии оценки качества образования: Сборник материалов XIV Ежегодного всероссийского форума с международным участием Гильдии экспертов в сфере профессионального образования «Международные стандарты и современные подходы к оценке качества образования» (Москва, 16 ноября 2018 г.) / под общ. ред. Г. Н. Мотовой. — Москва: Гильдия экспертов в сфере профессионального образования, 2018. — С. 11–15.
10. Approach to Processing of Data from Social Networks for Detecting Public Opinion On Quality of Educational Services / A. D. Khomonenko, V. L. Dashonok, K. A. Ivanova, D. T. Kassymova // Proceedings of XX IEEE International

Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2017), (Saint Petersburg, 24–26 May 2017) / S. Shaposhnikov (ed.). — IEEE, 2017. — Pp. 737–739.

DOI: 10.1109/SCM.2017.7970707.

11. Заболотский, М. А. Применение когнитивного моделирования в управлении качеством подготовки специалистов / М. А. Заболотский, И. А. Полякова, А. В. Тихонин // Управление большими системами: Сборник трудов. 2007. Вып. 16. С. 91–98.

12. Макарова, Е. Л. Когнитивное моделирование сбалансированного развития региональной системы высшего образования с учетом потребностей региона // Вестник Пермского университета. Серия ЭКОНОМИКА. 2018. Т. 13, № 4. С. 516–531.

DOI: 10.17072/1994-9960-2018-4-516-531.

13. Горелова, Г. В. Моделирование взаимосвязи проблем системы высшего образования и социально-экономической системы средствами когнитивного подхода / Г. В. Горелова, Е. Л. Макарова // Управление большими системами: Сборник трудов. 2010. Вып. 30.1. С. 431–452.

14. Кулинич, А. А. Когнитивная система поддержки принятия решений «Канва» // Программные продукты и системы. 2002. № 3. С. 25–28.

15. Коростелев, Д. А. Система поддержки принятия решений на основе нечетких когнитивных моделей «ИГЛА» / Д. А. Коростелев, Д. Г. Лагерева, А. Г. Подвесовский // Труды 11-й национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ'2008), (г. Дубна, 29 сентября–3 октября 2008 г.). — Т. 3. — Москва, [Ленанд], 2008. — С. 327–329.

16. Максимов, В. И. Программный комплекс «Ситуация» для моделирования и решения слабоформализованных проблем / В. И. Максимов, А. К. Григорян, Е. К. Корноушенко // Избранные труды I Международной конференции по проблемам управления (МКПУ I), посвященной 60-летию Института проблем управления (Москва, 29 июня–2 июля 1999 г.) — Т. 2. — Москва: СИНТЕГ, 1999. — С. 58–65.

17. Авдеева, З. К. Интегрированная система «КУРС» для когнитивного управления развитием ситуаций / З. К. Авдеева, В. И. Максимов, В. М. Рабинович // Труды Института проблем управления РАН. 2001. Т. XIV. С. 89–114.

18. Кулинич, А. А. Система концептуального моделирования социально-политических ситуаций «Компас» / А. А. Кулинич, В. И. Максимов // Современные технологии управления: Сборник докладов научно-практического семинара «Современные технологии управления для администрации городов и регионов» (Москва, 21–22 мая 1998 г.). — Москва, ИПУ РАН, 1998. — С. 115–123.

19. Гречко, М. В. Когнитивное моделирование как инструмент адаптивного управления качеством образования // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2017. Т. 13, Вып. 4 (349). С. 725–735.  
DOI: 10.24891/ni.13.4.725.

# On the Issue of Assessing the Quality of Education

S. V. Kiryushkin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University  
Saint Petersburg, Russia  
stasvkir@gmail.com

**Abstract.** The article examines the models for assessing the quality of education, used in Russia, Europe and the United States, provides an analysis of new promising approaches to assessing the quality of education. The technology of modeling the educational process uses heuristic, point-rating and simulation models. New approaches to assessing the quality of education include methods of cognitive modeling.

**Keywords:** quality of education, models, cognitive modeling.

## REFERENCES

1. COVID-19 Impact on Education, *UNESCO*. Available at: <http://en.unesco.org/covid19/educationresponse>. (accessed 17 Dec 2020).
2. Lessons of the «Stress Test»: Universities in a Pandemic and After It. Analytical Report [Uroki «Stress-testa»: vuzy v usloviyakh pandemii i posle nee. Analiticheskiy doklad]. July, 2020. 50 p. Available at: [http://www.hse.ru/data/2020/07/06/1595281277/003\\_Доклад.pdf](http://www.hse.ru/data/2020/07/06/1595281277/003_Доклад.pdf) (accessed 17 Dec 2020).
3. On Education in the Russian Federation: Federal Law [Ob obrazovanii v Rossiyskoy Federatsii: Federal'nyy zakon] from December 29, 2012 No. 273-FZ (last ed. December 08, 2020 No. 429-FZ).
4. On Approval of the State Program of the Russian Federation «Development of education»: Resolution of the Government of the Russian Federation [Ob utverzhdenii gosudarstvennoy programmy Rossiyskoy Federatsii «Razvitie obrazovaniya»: Postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii] from December 26, 2017 No. 1642 (last ed. December 31, 2020 No. 2424).
5. On Approval of the Procedure for Conducting Self-Examination by an Educational Organization: Order of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation [Ob utverzhdenii Poryadka provedeniya samoobsledovaniya obrazovatel'noy organizatsii: Prikaz Ministerstva obrazovaniya i nauki Rossiyskoy Federatsii] from June 14, 2013 No. 462 (last ed. December 14, 2017 No. 1218).
6. Guba K. S. Quality of Higher Education: A Review of International Practice [Otsenka kachestva vysshego obrazovaniya: obzor mezhdunarodnogo opyta], *University Management: Practice and Analysis [Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz]*, 2019, Vol. 23, No. 3, Pp. 94–107. DOI:10.15826/umpa.2019.03.022.
7. Zaichenko N. A. What We Evaluate When Evaluating the Quality of Education: Problems of Diversity [Chto my otsenivaem, kogda otsenivaem kachestvo obrazovaniya: problemy raznoobraziya]. In: *Volkova V. N., Fradkin V. E. (eds.) The System of Assessing the Quality of Education in St. Petersburg in 2018 [Sistema otsenki kachestva obrazovaniya v Sankt-Peterburge v 2018 godu]*. St. Peterburg, Saint Petersburg Center for Education Quality Assessment and Information Technologies, 2018, Pp. 38–46.
8. Kameneva E. A., Prikhodko L. V. Quality Assessment System for Higher Education: World and Russian Practice Analysis [Sistema otsenki kachestva vysshego obrazovaniya: analiz mirovoy i rossiyskoy praktiki], *Management and Business Administration [Menedzhment i biznes-administririvanie]*, 2018, No. 4, Pp. 112–124.
9. Vartumyan A. A., Klimenko I. S. Modern Approaches to Evaluation of Education Quality: Models and Algorithms [Sovremennye podkhody k otsenke kachestva obrazovaniya: modeli i algoritmy]. In: *New Technologies of Education Quality Assessment: Materials of XIV Annual Russian Forum of the Guild of Experts in Higher Education «International Standards and Modern Approaches to Evaluation of Education Quality» [Novye tekhnologii otsenki kachestva obrazovaniya: Sbornik materialov XIV Ezhegodnogo vserossiyskogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem Gil'dii ekspertov v sfere professional'nogo obrazovaniya «Mezhdunarodnye standarty i sovremennye podkhody k otsenke kachestva obrazovaniya»]*, Moscow, Russia, November 16, 2018. Moscow, Guild of Experts in the Sphere of Professional Education, 2018, Pp. 11–15.
10. Khomonenko A. D., Dashonok V. L., Ivanova K. A., Kassymova D. T. Approach to Processing of Data from Social Networks for Detecting Public Opinion On Quality of Educational Services. In: *S. Shaposhnikov (ed.) Proceedings of XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2017), Saint Petersburg, Russia, May 24–26, 2017*. IEEE, 2017, Pp. 737–739. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970707.
11. Zabolotsky M. A., Polyakova I. A., Tikhonin A. V. Application of Cognitive Modeling in Quality Management of Training Specialists [Primenenie kognitivnogo modelirovaniya v upravlenii kachestvom podgotovki spetsialistov], *Large-Scale Systems Control [Upravlenie bol'shimi sistemami]*, 2007, Is. 16, Pp. 91–98.
12. Makarova E. L. Cognitive Modeling of Balanced Development of Regional System of Higher Education Subject to the Needs of a Region [Kognitivnoe modelirovanie sbalansirovannogo razvitiya regional'noy sistemy vysshego obrazovaniya s uchetom potrebnostey regiona], *Perm University Herald. ECONOMY [Vestnik Permskogo universiteta. Seriya EKONOMIKA]*, 2018, Vol. 13, No. 4, Pp. 516–531. DOI: 10.17072 / 1994-9960-2018-4-516-531.
13. Gorelova G. V., Makarova E. L. Modeling Correlation Between Socioeconomic System and Higher Education System Problems with Cognitive Approach [Modelirovanie vzaimosvyazi problem sistemy vysshego obrazovaniya i sotsial'no-ekonomicheskoy sistemy sredstvami kognitivnogo podkhoda], *Large-Scale Systems Control [Upravlenie bol'shimi sistemami]*, 2010, Is. 30.1, Pp. 431–452.
14. Kulinich A. A. Cognitive Decision Support System «Kanva» [Kognitivnaya sistema podderzhki prinyatiya

resheniy «Kanva»], *Software and Systems [Programmnye produkty i sistemy]*, 2002, No. 3, Pp. 25–28.

15. Korostelev D. A., Lagerev D. G., Podvesovsky A. G. Decision Support System Based on Fuzzy Cognitive Models «IGLA» [Sistema podderzhki prinyatiya reshenii na osnove nechetkikh kognitivnykh modeley «IGLA»], *Proceedings of the 11th National Conference on Artificial Intelligence with International participation [Trudy 11 natsional'noy konferentsii po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem] (KII'2008), Dubna, Russia, September 29–October 3, 2008. Vol. 3. Moscow, 2008, Pp. 327–329.*

16. Maksimov V. I., Grigoryan A. K., Kornoushenko E. K. Software Package «Situation» for Modeling and Solving Weakly Formalized Problems [Programmnyy kompleks «Situatsiya» dlya modelirovaniya i resheniya slaboformalizovannykh problem], *Selected Proceedings of the I International Conference on Management Problems [Izbrannye trudy I Mezhdunarodnoy konferentsii po problemam upravleniya] (MKPU I), Moscow, Russia, June 29–July 2, 1999. Vol. 2. Moscow, SINTEG Publishing House, 1999, Pp. 58–65.*

17. Avdeeva Z. K., Maksimov V. I., Rabinovich V. M. Integrated System «COURSE» for Cognitive Management of Situation Development [Integrirovannaya sistema «KURS» dlya kognitivnogo upravleniya razvitiem situatsiy], *Proceedings of Institute of Control Sciences of RAS [Trudy Instituta problem upravleniya RAN]*, 2001, Vol. XIV, Pp. 89–114.

18. Kulinich A. A., Maksimov V. I. The System of Conceptual Modeling of Socio-Political Situations «Compass» [Sistema kontseptual'nogo modelirovaniya sotsial'no-politicheskikh situatsiy «Kompas»]. In: *Modern Management Technologies: Collection of Reports of the Scientific and Practical Seminar «Modern Management Technologies for the Administration of Cities and Regions» [Sovremennye tekhnologii upravleniya: Sbornik dokladov nauchno-prakticheskogo seminara «Sovremennye tekhnologii upravleniya dlya administratsii gorodov i regionov»]*, Moscow, Russia, May 21–22, 1998. Moscow, Institute of Control Sciences of RAS, 1998, Pp. 115–123.

19. Grechko M. V. Cognitive Modeling as a Tool for Adaptive Management of Education Quality [Kognitivnoe modelirovanie kak instrument adaptivnogo upravleniya kachestvom obrazovaniya], *National Interests: Priorities and Security [Natsional'nye interesy: priority i bezopasnost']*, 2017, Vol. 13, No. 4 (349), Pp. 725–735. DOI: 10.24891/ni.13.4.725.

# Об одном способе подавления боковых лепестков функции автокорреляции

д.т.н. В. А. Ходаковский

Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I  
Санкт-Петербург, Россия  
hva1104@mail.ru

д.т.н. С. А. Лобов

Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения  
Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** Рассматривается возможность улучшения отклика коррелятора за счет использования комплексной свертки. Рассмотрены основные понятия, моделирование широкополосного сигнала. В качестве исследуемого сигнала используется математическая модель сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) — сигнала с квадратичным законом изменения фазы. Рассмотрен вопрос о комплексной свертке и преобразовании Гильберта. Приведены программа вычисления квадратурной компоненты сигнала, а также программы вычисления свертки. Показано, что в отклике коррелятора можно существенно подавить боковые всплески, что повышает возможности при решении задач обнаружения сигнала в шумах, распознавания изображений и т. д.

**Ключевые слова:** свертка, корреляция, автокорреляционные свойства.

## ВВЕДЕНИЕ

При решении многих технических задач требуется вычисление свертки функций и их кросс корреляции. В радиотехнических задачах обнаружения сигнала в шумах традиционно используются сигналы, обладающие широким спектром, к которым относятся  $m$ -последовательности, коды Баркера и т. д.

Вместе с тем коды Баркера с числом символов более 13, как известно, не существует, а автокорреляционные свойства  $m$ -последовательностей не позволяют получать уровень боковых всплесков менее  $1/\sqrt{N}$ , где  $N$  — число символов в последовательности.

В указанной связи наряду с поиском сигналов с идеальными автокорреляционными свойствами актуальной представляется задача поиска способов, которые позволят отличить сигнал от его инверсной копии. Здесь под инверсной копией понимается последовательность, в которой порядок следования символов является обратным к исходному порядку следования.

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

С точки зрения математической статистики ковариационная функция двух случайных величин определяется как второй смешанный момент

$$Cov(X, Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (X - \bar{X}) \times (Y - \bar{Y}) \times p(X, Y) dx dy, \quad (1)$$

где  $p(X, Y)$  — двумерная плотность вероятностей распределения величин  $X$  и  $Y$ .

Зная ковариационную функцию (1), корреляционную функцию можно получить путем нормирования (1) на произведение средних квадратических отклонений величин  $X$  и  $Y$ :

$$R(X, Y) = \frac{1}{sig(X) \times sig(Y)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (X - \bar{X}) \times (Y - \bar{Y}) \times p(X, Y) dx dy. \quad (2)$$

Если случайные величины  $X$  и  $Y$  нормированы по математическому ожиданию, то выражение (2) упрощается:

$$R(X, Y) = \frac{1}{sig(X) \times sig(Y)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} X \times Y \times p(X, Y) dx dy. \quad (3)$$

Если случайные величины  $X$  и  $Y$  равны друг другу, то под интегралом получим математическое ожидание квадрата случайной величины, которое делится на ту же дисперсию, то есть получим единицу.

В выражении (3) переменные интегрирования пробегают все значения в бесконечном интервале и в соответствии со значениями двумерной плотности интегрируются произведения величин  $X$  и  $Y$ . Очевидно, что в выражениях (1–3) должно обеспечиваться условие нормировки двумерной плотности

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(X, Y) dx dy = 1. \quad (4)$$

Для эргодических случайных процессов  $X$  и  $Y$  двумерная плотность распределения может быть заменена на одномерную, которая учитывает только сдвиг процессов относительно друг друга, тогда выражение для ковариации случайных процессов с нулевым математическим ожиданием может быть определено как свертка данных процессов во временной области:

$$Cov(\tau, X, Y) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) * Y(t - \tau) * p(t) dt, \quad (5)$$

или, для случая дискретных процессов,

$$Cov_i = \sum_{k=1}^{N-i} X_k Y_{k+i} H_i, \quad (6)$$

где  $H_i$  — вектор, являющийся дискретным аналогом плотности вероятностей процессов  $X$  и  $Y$ .

Здесь необходимо отметить, что в технических системах аналог плотности обычно опускают, предполагая, что этот вектор не известен и тогда свертку вычисляют по формуле

$$Cov_i = \sum_{k=1}^{N-i} X_k Y_{k+i}. \quad (7)$$

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО СИГНАЛА

Рассмотрим, как влияет учет вектора  $H$  при вычислении свертки реальных процессов. Пусть задан процесс с квадратичным изменением фазы (аналог ЛЧМ-сигнала)

$$f(t) = \begin{cases} \sin\left(\frac{t^2}{\pi}\right), & 0 < t < 9, \\ 0, & |t| > 9. \end{cases} \quad (8)$$

Сформируем из (8) дискретный процесс из  $N = 64$  отсчетов.

На рисунке 1 приведен процесс (7) и его дискретный аналог, а на рисунке 2 — нормированная автокорреляционная функция (АКФ), вычисленная по формуле (7).

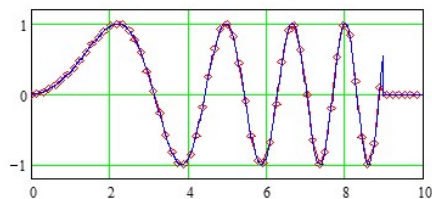


Рис. 1. Сигнал ЛЧМ (линия) и дискретный аналог (точки)

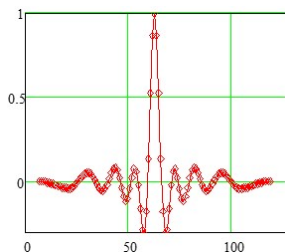


Рис. 2. Нормированная автокорреляционная функция сигнала ЛЧМ

Анализируя рисунок 2, можно заметить, что центральный пик АКФ сильно выражен, но отношение амплитуды центрального пика к максимальному боковому составляет всего 3,2, а в логарифмической мере по квадрату амплитуды (то есть по мощности) это соответствует 10,1 дБ, что совсем не много.

В радиотехнических системах очень часто требуется обнаруживать сигнал, мощность которого по сравнению с аддитивным шумом равна или даже значительно меньше мощности входного шума, поэтому необходимо существенно повысить разрешающую способность корреляционного приема сигналов [1–4].

Тем более что уже сейчас известны последовательности, обладающие идеальными автокорреляционными свойствами, когда отношение центрального пика АКФ последовательности к максимальному ее боковому пику составляет 40 дБ и более [5–9], но это относится к широкополосным последовательностям с высоким пик-фактором, а главное, к последовательностям, среднее значение которых не равно нулю. Как известно, наличие постоянной составляющей не обеспечивает возможности непосредственной (без использования методов модуляции) передачи таких последовательностей по радиоканалу, а применение методов модуляции сводит на нет идеальные корреляционные свойства данной последовательности.

#### О КОМПЛЕКСНОЙ СВЕРТКЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИИ ГИЛЬБЕРТА

Для улучшения корреляционных свойств последовательности необходимо, чтобы начальные элементы последовательности (от начала и вплоть до середины) не коррелировали с конечными элементами (практически от середины и до ее конца), и только когда начало первой последовательности совпадает с началом второй возникает сильная корреляция.

С точки зрения статистической связи последовательностей сильная корреляция означает, что при конкретном

сдвиге одной последовательности относительно другой при возрастании значений элементов первой последовательности элементы второй также возрастают, и наоборот, при убывании элементов первой элементы второй также должны убывать, тогда при нулевом сдвиге возникает сумма квадратов всех элементов последовательности, а сумма квадратов — это дисперсия, то есть мощность сигнала.

Значит, свертка при нулевом сдвиге должна в идеале давать мощность сигнала, если сигнал коррелирует с себе подобным, и наоборот, свертка должна давать минимальный отклик, если сигналы не коррелированы.

Возвратимся к сигналу ЛЧМ (рис. 1) Обратим внимание на то, что начало последовательности является низкочастотным сигналом, а конец, наоборот, высокочастотным, то есть начало и конец не должны давать высокой корреляции. И действительно, анализ АКФ (2) показывает, что левый и правый концы АКФ дают слабую взаимную корреляцию, а при приближении к середине АКФ амплитуда всплесков возрастает, переходя в центре к главному лепестку.

Многие исследователи давно обратили внимание на то, что интегральная свертка (формулы 1–3) — это, по сути, сумма скалярных произведений всех мгновенных векторов, которые описывают сигнал. А скалярное произведение есть проекция одного вектора на направление второго, то есть произведение векторов с учетом косинуса угла между векторами. Значит, нам необходимо для всех моментов сдвига найти косинус угла между векторами, описывающими наши последовательности.

Исходя из этих позиций, перейдем к комплексному представлению сигнала (8). Для этого нужно найти сигнал, комплексно-сопряженный с сигналом ЛЧМ. Здесь есть несколько вариантов: либо к сигналу (8) применить преобразование Гильберта, либо использовать прямое преобразование Фурье сигнала (8), затем поменять местами действительную и мнимую часть в его спектре и выполнить обратное преобразование Фурье.

Дело в том, что смена мест действительной и мнимой части в спектре — это, по сути, поворот фаз всех гармоник в спектре сигнала на 90 градусов, а преобразование Гильберта делает именно это. На рисунке 3 приведена программа для среды Mathcad, позволяющая найти квадратурную компоненту сигнала. В данной программе кроме перемены мест действительных и мнимых частей спектра выполнены также две процедуры: выделения из сигнала после обратного преобразования Фурье только действительных компонент и обратной сортировки полученного вектора.

$$\text{Hilb}(X) := \begin{cases} n \leftarrow \text{rows}(X) \\ Sp \leftarrow \text{fft}(X) \\ Sq \leftarrow \text{iff}(\text{Im}(Sp) + i \cdot \text{Re}(Sp)) \\ \text{for } i \in 0..n-1 \\ Su_i \leftarrow \left( \sqrt{\text{Re}(Sq_i)^2 + \text{Im}(Sq_i)^2} \right) \cdot (\sin(\arg(Sq_i)) + i \cos(\arg(Sq_i))) \\ \text{reverse}(Su) \end{cases}$$

Рис. 3. Программа вычисления квадратурной компоненты сигнала

Для сравнения на рисунке 4 приведен исходный сигнал и его квадратурная компонента. Из графиков видно, что когда основной сигнал достигает максимума, то его квадратурная компонента имеет перегиб и наоборот, что как раз и является результатом сдвига фазы сигнала.

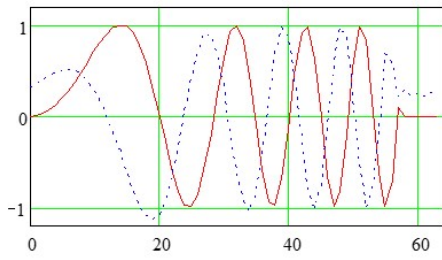


Рис. 4. Сигнал ЛЧМ (сплошная линия) и его квадратурная компонента (пунктир)

Условно основной сигнал можно назвать косинусной компонентой, а, соответственно, синусной — его квадратуру. Тогда текущий фазовый угол сигнала может быть определен как обратный тангенс от отношения синусной и косинусной компонент сигнала. На рисунке 5 приведен график изменения фазы сигнала и ее косинуса.

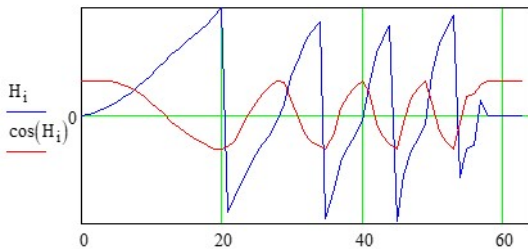


Рис. 5. Закон изменения фазы сигнала (синяя кривая) и ее косинуса (красная кривая)

Из анализа рисунка 5 следует, что фаза сигнала возрастает по квадратичному закону, совершая скачки в моменты перехода сигнала через ноль, при этом косинус комплексной фазы сигнала положителен, когда сигнал переходит ноль с минуса на плюс и наоборот, причем в этот момент фаза совершает скачок в обратном направлении.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ СВЕРТКИ

Теперь, имея угол между сворачиваемыми векторами можно вычислить свертку по формуле (6). На рисунках 6 и 7 приведены две процедуры для среды Mathcad, позволяющие вычислить свертку при разных весовых функциях.

```

zcorr(x,y) :=
n ← rows(x)
Xs ← Hilb(x)
Ys ← Hilb(y)
H ← atan2(Xs,x)
for i ∈ 0..n - 1
    Ri ← ∑k=0n-i-1 (xk·yk+i·cos(atan2(Ys,y)i)2)
R
    
```

Рис. 6. Программа 1 вычисления свертки

```

zcorr(x,y) :=
n ← rows(x)
Xs ← Hilb(x)
Ys ← Hilb(y)
H ← atan2(Xs,x)
for i ∈ 0..n - 1
    Ri ← ∑k=0n-i-1 (xk·yk+i·exp[-π4·(1 - cos(Hi)8])
R
    
```

Рис. 7. Программа 2 вычисления свертки

В первом варианте процедуры (рис. 6) вычисления свертки в качестве весовой функции использован квадрат косинуса текущего фазового угла, во втором варианте (рис. 7) использована «обостренная» экспонента.

На рисунке 8 приведен пример вычисления свертки с использованием первой процедуры. В качестве весовой функции использован квадрат косинуса текущей фазы комплексного сигнала.

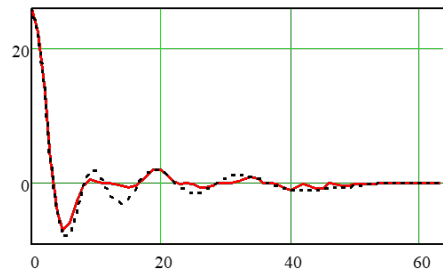


Рис. 8. Результат вычисления свертки для сигнала ЛЧМ без весовой функции (пунктир) и с ее применением (сплошная линия)

На рисунке 9 приведен пример вычисления свертки с использованием второй процедуры. В качестве весовой функции использована экспонента от специально подобранной функции.

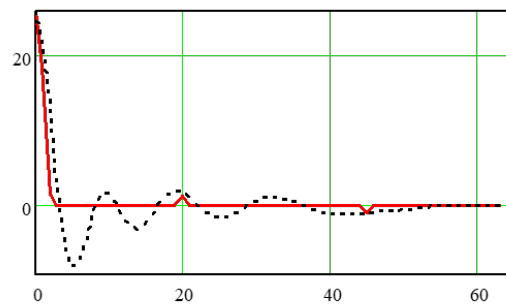


Рис. 9. Результат вычисления свертки для сигнала ЛЧМ без весовой функции (пунктир) и с ее применением (сплошная линия).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ рисунков 8 и 9 позволяет заключить, что добавление весовой функции в виде косинуса текущей фазы дает возможность несколько подавить боковые лепестки АКФ, а использование второй процедуры способствует практически полному подавлению боковых всплесков

АКФ, оставляя неизменным центральный пик, что обеспечивает получение логарифма отношения уровня центрального пика к максимальному боковому на уровне не хуже 30 дБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Синтез сигналов с оптимальными по уровню боковых лепестков автокорреляционными свойствами / В. А. Ходаковский, В. Г. Дегтярев, П. В. Герасименко, С. В. Микони // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2018. Т. 15, Вып. 4. С. 629–636.
2. Ходаковский, В. А. О теореме отсчетов и ее применении для синтеза и анализа сигналов с ограниченным спектром / В. А. Ходаковский, В. Г. Дегтярев // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2017. Т. 14, Вып. 3. С. 562–573.
3. On Neural Network Online Learning Algorithm / D. V. Zuev, V. V. Garbaruk, V. A. Khodakovsky, [et al.] // Proceeding of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2016), (Saint Petersburg, May 25–27, 2016). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. — Pp. 279–280. DOI: 10.1109/SCM.2016.7519753.
4. Ходаковский, В. А. Мера сходства узкополосных сигналов / В. А. Ходаковский, Т. В. Ходаковский // Автоматика на транспорте. 2015. Т. 1, № 2. С.180–194.
5. Ипатов, В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения / Пер. с англ. Ю. О. Каратасо; под ред. В. П. Ипатова. — Москва: ЗАО «РИЦ «Техносфера», 2007. — 487 с. — (Мир связи).
6. Варакин, Л. Е. Системы связи с шумомодобными сигналами. — Москва: Радио и связь. Редакция литературы по радиотехнике, 1985. — 384 с.
7. Ипатов, В. П. Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами. — Москва: Радио и связь. Редакция литературы по радиотехнике и электросвязи, 1992. — 152 с.
8. Ипатов, В. П. Троичные последовательности с идеальными периодическими автокорреляционными свойствами // Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24, № 10. С. 2053–2057.
9. Ипатов, В. П. К теории троичных последовательностей с идеальными периодическими автокорреляционными свойствами // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25, № 4. С. 723–727.

# On One Method of Suppressing Lateral Sets of the Autocorrelation Function

Grand PhD V. A. Khodakovsky

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University  
Saint Petersburg, Russia  
hva1104@mail.ru

Grand PhD S. A. Lobov

Saint-Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation  
Saint Petersburg, Russia

**Abstract.** The possibility of improving the response of the correlator by using complex convolution is considered. Basic concepts, modeling of a broadband signal are considered. As the signal under study, a mathematical model of a signal with linear frequency modulation (LFM) is used - a signal with a square-law phase change. The question of complex convolution and Hilbert transform is considered. The program for calculating the quadrature component of the signal, as well as the program for calculating the convolution is presented. It is shown that in the correlator response it is possible to significantly suppress lateral bursts, which increases the possibilities for solving problems of signal detection in noise, image recognition, etc.

**Keywords:** correlator, convolution, mathematical model, signal detection in noise.

## REFERENCES

1. Khodakovskii V. A., Degtiarev V. G., Gerasimenko P. V., Mikoni S. V. Design of Signals with Autocorrelated Qualities That Have Optimised Sidelobe Level [Sintez signalov s optimal'nymi po urovnyu bokovykh lepestkov avtokorrelatsionnymi svoystvami], *Proceedings of Petersburg Transport University [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya]*, 2018, Vol. 15, Is. 4, Pp.629–636.
2. Khodakovskiy V. A., Degtyarev V. G. On Sampling Theorem and Its Application for the Purposes of Synthesis and Analysis of Band-Limited Signals [O teoreme otschetov i ee primenenii dlya sinteza i analiza signalov s ogranichennym spektrom], *Proceedings of Petersburg Transport University [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya]*, 2017, Vol. 14, Is. 3, Pp. 562–573.
3. Zuev D. V., Garbaruk V. V., Khodakovsky V. A., et al. On Neural Network Online Learning Algorithm, *Proceeding of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM 2016), Saint Petersburg, Russia, May 25–27, 2016*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016, Pp. 279–280.  
DOI: 10.1109/SCM.2016.7519753.
4. Khodakovsky V. A., Khodakovsky T. V. On Similarity Measure of Narrow Band Signals [Mera skhodstva uzkopolosnykh signalov], *Automation on Transport [Avtomatika na transporte]*, 2015, Vol. 1, No. 2, Pp. 180–194.
5. Ipatov V. P. Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications [Shirokopolosnye sistemy i kodovoe razdelenie signalov. Printsipy i prilozheniya]. Moscow, TECHNOSPHERA Publishing Company, 2007, 487 p.
6. Varakin L. E. Communication systems with noise-like signals [Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami]. Moscow, Radio and Communications, 1985, 384 p.
7. Ipatov V. P. Periodic discrete signals with optimal correlation properties [Periodicheskie diskretnye signaly s optimal'nymi korrelyatsionnymi svoystvami]. Moscow, Radio and Communications, 1992, 152 p.
8. Ipatov V. P. Ternary Sequences with Ideal Periodic Autocorrelation Properties [Troichnye posledovatel'nosti s ideal'nymi periodicheskimi avtokorrelatsionnymi svoystvami], *Radio Engineering and Electronic Physics [Radiotekhnika i elektronika]*, 1979, Vol. 24, No. 10, Pp. 2053–2057.
9. Ipatov V. P. On the Theory of Ternary Sequences with Ideal Periodic Autocorrelation Properties [K teorii troichnykh posledovatel'nostey s ideal'nymi periodicheskimi avtokorrelatsionnymi svoystvami], *Radio Engineering and Electronic Physics [Radiotekhnika i elektronika]*, 1980, Vol. 25, No. 4, Pp. 723–727.

# Analysis of the Application of the New Bitumen Method for Railway Construction

V. A. Ksenofontova

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University  
Saint Petersburg, Russia  
koc-vera@yandex.ru

**Abstract.** Bitumen is a major component of asphalt. It, like other viscous petroleum products, is characterized by loss of fluidity during transport at low ambient temperatures. The paper proposes a new method for transporting road bitumen as a saturated cargo in the form of a pellet with a protective cover preventing moulding and forming a component of asphalt concrete. The process of transport of viscous petroleum products is discussed in detail. A system of mathematical models of the process of transport of viscous petroleum products was constructed, followed by simulation and functional-cost analysis.

**Keywords:** bitumen, railway services, mathematical model, simulation model, viscous petroleum products, business process, Petri net.

## INTRODUCTION

The road system of the Russian Federation dates back to the Russian Empire and continues to develop to this day. The Government of the Russian Federation has approved a number of regulatory documents which justify the country's transport strategy up to 2030.

The expected results of this development are:

- creating conditions for economic growth;
- improving the competitiveness of the national economy and the quality of life of the population;
- ensuring access to safe and quality transport services;
- turning Russia's geographical features into its competitive advantage for the transit of goods from Europe to South-East Asian countries.

The objective of improving the quality, efficiency and staffing of the Russian transport sector is achieved by:

- development of the network and improvement of the quality of federal roads;
- the commissioning of new roads of federal importance after construction and reconstruction;
- improving the level of integrated settlement in rural areas by public roads. (In particular, roads leading from the public road network to the nearest sites of public interest, as well as agricultural production and processing facilities, should be paved);
- improving the efficiency and security of the transport system through the development of a sectoral education system and increasing the level of personnel support for transport activities.

On the basis of the above-mentioned plans for the construction and reconstruction of existing roads in Russia, it can be said that their implementation will require large volumes of bitumen transport for road construction and repair. This paper addresses issues aimed at reducing road bitumen delivery costs. It is one of the most important components of asphalt

concrete, which is used as a hard pavement for roads, access roads and unloading areas.

## BITUMEN. PROPOSAL OF A NEW DELIVERY MODEL

The considerable difficulties of rail transport of dark viscous petroleum products (oil, tar, bytums etc.) in the Russian Federation are due to the long distances and cold climate of the country. During the cold season, which in some regions extends up to 8-9 months per year, the cargo is cooled during transport, resulting in a sharp increase in its viscosity, up to a hardened state [1-3]. Consequently, the problem of unloading the oil delivered by the consignee immediately arises.

The standard solution to this problem is heating of the oil cargo to restore its fluidity before discharge and the use of tank-wagons with heat-insulating boiler casings. These thermosis tanks shall, to varying degrees, slow down the cooling of the oil cargo during its carriage [4-7].

The main types of wagons for the transport of oil-bitumen, oil and coal-fired pecks are bunker-type wagons and thermos tanks with electric and steam heating.

The structure of the bunker wagon makes it possible to load the bitumen in liquid form at temperatures close to 200 °C, and the wagon is unloaded when the bunkers roll over on one side of the track. The double lining of the wagon framework makes it possible to pour steam into the internal space between the shells in order to heat the bitumen before unloading, thus ensuring its guaranteed unloading during the cold season [8-10].

What is proposed below is a new, radically different way of delivering high-viscous solidifying oil products, the bulk of which are road-building bitumen in terms of transport volumes.

The essence of the method is that, in order to reduce the cost of all bitumen transport operations involving their loading in railway wagons, transport, unloading, trans-shipment to road or water transport and, Finally, the bitumen is initially prepared in the form of a pellet by storage in warehouses or on sites.

Pellets are considered to be solid cylinders prepared in factory conditions at refineries and having a protective envelope to prevent them from being fused together and placed on the walls of a transport or storage container, for example, a wagon or container.

Bitumen is a component of asphalt concrete, which is paved on roads. The amount of bitumen is about 12-14 % by weight of all ingredients forming asphalt concrete. Other components of asphalt concrete are sand, fine granite crumbs, lime, surfactants.

The composition of the asphalt concrete is determined by such factors as the characteristics of the moisture content of the ground beneath the road surface, the intensity of the road operation, its cost, the time of its self-sustainability and many others.

Asphalt concrete ingredients such as fine sand and lime can themselves be used as a pellet shield. The possibility of preparing, transporting and directly using the pellet DSNB is due to the fact that the bitumen:

- have a high softening temperature close to plus 60 °C;
- the rigidity and elasticity suitable for the transport objectives;
- does not interact with water and snow;
- have low thermal conductivity.

The main advantages of preparing bitumen in the form of a pellet are that during the cold season it can be delivered and processed as bulk rather than bulk cargo. For this purpose, it is possible to use platforms-pipes, semi-cars, containers, and from floating means — open barges.

During transport operations, it is not necessary to heat the delivered oil product in order to restore fluidity during unloading, it is not necessary to use a specialized rolling stock having a very large (up to 50 %) return empty mileage, conditions of storage in warehouses and on site are simplified.

In the new mode of transport and the use of bitumen, the question arises of the cross-linking of pellets between them under external heat and under static loads.

For the study, consider the pellets loaded in the container (as an option in the wagon for bulk cargoes).

Consider a container with pellets as a certain body containing a heterogeneous (in our case, two-component) medium consisting of a pellet shaped as a cylinder, between which the contact passes along a thin line and the space between which is filled with air. The pellets are connected to each other by gravity and mutual friction. The transfer of mechanical loads and heat from one cylinder to the other is carried out along the contact lines between the parallel cylinders. In addition, heat is transferred through the air in the gaps between the cylinders due to the molecular heat conductivity.

In the case of an embankment in a semi-car, the cylindrical pellets are arranged in the body of the semi-wagon in a random manner, and the pellets can be arranged in an orderly fashion in parallel layers, as shown in figure 1. This kind of heterogeneous environment in construction mechanics is commonly called «grainy media».

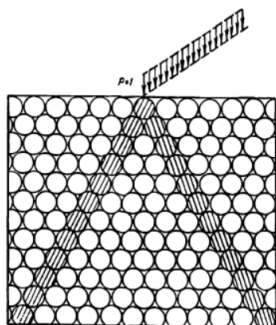


Fig. 1. A scheme of pressure distribution in a grainy medium of ideal cylinders

The granular medium is understood as a system of disconnected bodies interacting with each other through point contacts.

The apparatus of the mechanics of grainy media was developed by Prof. I. I. Kandaurov [8]. He suggested that the distribution of stresses in an environment should be seen as a random process of transferring loads from the upper layers to

the lower layers. Granular environments are generally divided into uncontested environments where lateral stresses are not distributed and spacers for which the spacing coefficient  $k$  can be introduced (fig. 1).

The pellets loaded into the body of the wagon by the mound can be considered as a quiet environment, and those placed in an orderly manner into the container can be considered as an empty environment.

The grain medium model of Kandaurov I. I. [8] introduces the assumption that the average number of contacts that has one spherical particle in a nondisputed medium in the spatial three-dimensional problem is 8, and in the flat problem is 4. This provision has been introduced, Based on the most likely particle package to ensure the statistical stability of their ensemble.

This has been confirmed and experimentally demonstrated in tests with grainy media such as sand, gravel and fine granite crumbs [8].

When the pellet is loaded into the body of the wagon by means of an embankment and arranged on the side walls of the wagon body by means of layers, the forces of emptying respectively saturated and rolled goods act.

The static pressure of the base load assembly per unit of the body wall area shall in general be calculated by the formula:

$$p_{\alpha} = \frac{(1+k)\gamma g y \sin(\alpha+\phi)}{\sin^2(\alpha-\delta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi+\delta) \sin(\phi-\beta)}{\sin(\alpha-\delta) \sin(\alpha+\beta)}} \right]^2},$$

where  $\alpha$  is the angle of the body to the horizon,  $\beta$  is the angle of the surface of the cargo to the horizon. For the vertical walls of the body of a semi-car loaded «without a cap»  $\alpha = 90^{\circ}$  and  $\beta = 0$ . In the case of bitumen transport in the body of a doomcara platform, the two values have different values depending both on the type of the car model and its occupancy level;

$\delta$  is the friction angle of the cargo against the metal walls of the body (set according to special normative tables);

$\phi$  is the angle of natural discharge formed by the surface of freely saturated cargo relative to the horizontal, rada;

$g$  is the acceleration of gravity,  $m/s^2$ ;

$y$  is the distance from the surface of the bulk cargo to the point where the pressure is determined, m;

$\gamma$  is the calculated saturation density of the cargo (taken as a quotient of the division of the carrying capacity of the wagon by the volume of the bodywork), rad;

$k$  is the coefficient of vertical dynamics. In uniform motion, take  $k = 0,1$ . For calculated acceleration or impact modes, normative tables are given.

For the vertical walls of a semi-car ( $\alpha = 0$ ), when loading «without a cap» ( $\beta = 0$ ) and without taking into account the friction of the cargo against the wall of the body ( $\delta = 0$ ), the latter formula is simplified and takes the form of:

$$p_{\alpha} = (1 + k)\gamma g y t g^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right).$$

Let us make the last simplistic assumption that the pellet is loaded into the semi-car so that its upper surface is horizontal ( $\phi = 0$  rad). The tangent is equal to one. Note that the bulk weight of the oil cargo carried as a pellet  $\gamma = 800 \text{ kg/m}^3$ . Then the test pressure on the sides of the wagon at a height of  $y = 1,5 \text{ m}$  ( $cd = 0,1$ ) will be:

$$p_{\alpha} = 1,1 \times 800 \times 9,8 \times 1,5 = 12\,936 \frac{N}{m^2}.$$

This low pressure of the bulk bitumen is not likely to create any dangerous situations for a cargo semi-car with a metal body.

Let's stop now at the equivalent thermal conductivity of the transported oil cargo. The bulk pellet in a container or in a semi-car can be considered as a two-phase system where one of the phases (air) is distributed continuously and the other (the bitumen cylinders themselves) is discretely in the form of separate parallel layers having linear contact with each other. Figure 2 provides a design cell of tightly packed cylinders. This figure shows that, when packed tightly, each cylinder is surrounded by six adjacent cylinders and has six points of contact with them.

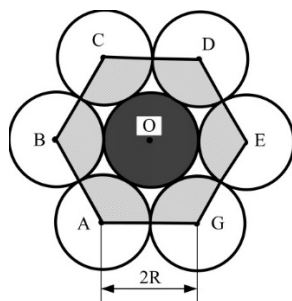


Fig. 2. A two-phase system for uniformly distributed spherical particles

Connect the cents of the ABCDEG cylinders, the same radius  $R$ , which are in contact with the central cylinder  $O$ . As we can see, the calculated cell has the shape of a regular hexagon with a side equal to  $2R$ . We consider that all cylinders have unit length and therefore their volumes are numerically equal to the end area.

The area of a regular hexagon with a side of  $2R$  is equal

$$S_{\text{cell}} = 6\sqrt{3}R^2 = 10,2R^2.$$

Inside the cell is one central cylinder with a base area  $S$  and six cylinder segments with an area  $S/3$  each. Therefore, the total area of the solid phase (in figure 2 of the shaded area) is equal to

$$S_{\text{solid phase}} = 3\pi R^2 = 9,42R^2.$$

Area of cell per gas phase (air)

$$S_{\text{gas phase}} = S_{\text{cell}} - S_{\text{solid phase}} = (6\sqrt{3} - 3\pi)R^2 = 0,9R^2.$$

Then the relative volume occupied by the gaseous phase (taking into account that the length of the cylinders is conditionally assumed to be equal to one) will be:

$$V_{\text{relative}} = \frac{S_{\text{gas phase}}}{S_{\text{solid phase}}} = \frac{0,9}{9,42} = 0,0956.$$

The heat flow is considered to be directed perpendicular to the plane of the layers, wherein the Maxwell-Eichen formula is used to determine the equivalent heat conductivity of a two-phase system comprising air and bitumen in the form of a pellet. Under these conditions, the medium-volume thermal conductivity of the medium will be:

$$\lambda_{eq} = \lambda_{gas} \frac{1+2V_{\text{relative}}^{\text{solid phase}}}{1-V_{\text{relative}}^{\text{gas phase}}} = 0,024 \times \frac{1+2 \cdot 0,95}{1-0,088} \approx 0,0756 \frac{\text{Wt}}{\text{m}\cdot\text{grad}},$$

where  $\lambda_{gas} = 0,024 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$  is the coefficient of thermal conductivity of air in thin interlayers. The numerator contains

the volumetric fraction of the solid phase (i. e. occupied by pellets) and the denominator contains the volumetric fraction of the gas phase.

As we can see, the equivalent heat conductivity of the bitumen in the form of a pellet is almost twice as small as that of monolithic bitumen.

#### MATHEMATICAL MODEL FOR THE CARRIAGE OF BITUMEN BY RAIL

Modern mathematical models are distinguished by the complexity of the models associated with the complexity of the objects being modelled.

The process of constructing any mathematical model is broken down into several steps:

1. Description of the existing model.
2. Mathematical Problem Statement.
3. Model correctness and problem solving (in our case with simulation).
4. Model adequacy check (comparison of simulation results and real data).
5. Analysis of the results.

Description of the transport process model. The process of transport of viscous petroleum products to the final consumer consists of the following steps:

1. The composition shall be cleaned of the residues of the viscous petroleum products (at the washing and cleaning station).
2. Inspection of the convoy commercially with a view to the suitability of the tank for loading the specific cargo.
3. If no malfunction has been detected and the convoy is ready for loading, the station officer on duty shall be informed.
4. The viscous petroleum products shall be heated and sealed in the railway tank, the wagon shall be closed and sealed.
5. The railway tanks are sent to the adjoining station to form a convoy.
6. The train shall be inspected and sent to the final station of the consignee. The consignee shall be informed in writing of the consignment. If a railway tank is found to be defective in route, either it is repaired and the cargo continues on its way, or the cargo is pumped into another tank and a decision is made to proceed.

7. Upon the arrival of the cargo at the final station, the cargo is heated, unloaded and dispatched for cleaning and flushing of the remaining cargo.

The most costly operations are the processes of clearing the wagon of residual cargo and unloading.

Mathematical model construction. The transport process model described above is a system of related procedures, that is, a business process that is described graphically using the Petri networks [11–13].

When analyzing the processes that accompany the transport of viscous petroleum products, it can be seen that some of the processes run in parallel. In the terminology of Petri networks, this means that several active transitions claim one mark of some position. So, the Petri network in question is conflicting.

To simplify further analysis, divide the original transport process into sub-processes, that is, decompose it. The Petri network in this case will be divided into subnets. The top-level network is built on figure 3.

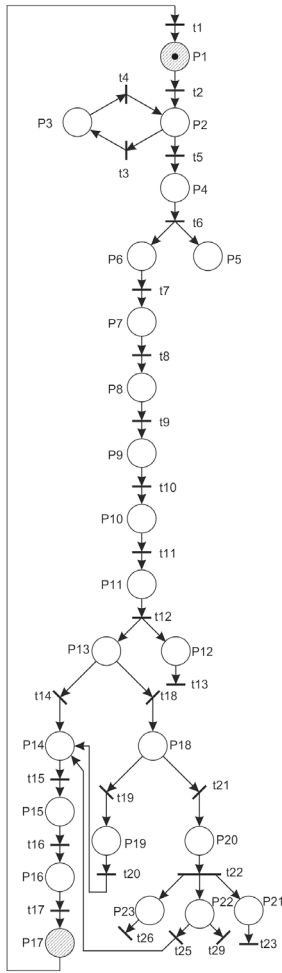


Fig. 3. Petri Network of Transport Process from refinery to end-user

Similarly, we shall describe with the help of the Petri networks the processes that are the most expensive, namely the cleaning processes (fig. 4) and the landings.

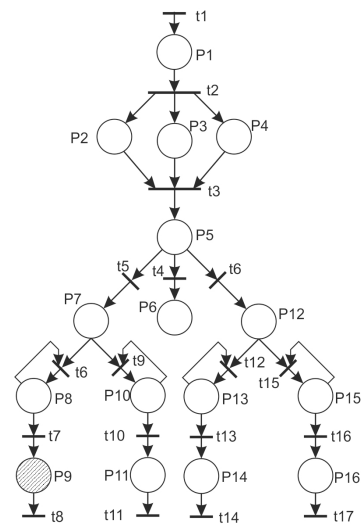


Fig. 4. Processes accompanying the purification of the boiler of the tank-wagon from the remnants of viscous petroleum products

The most labour-intensive process of cleaning the tank wagon of the residues of viscous petroleum products is discussed in more detail below (fig. 5 and 6).

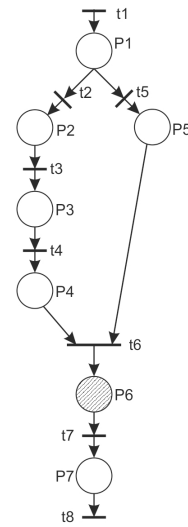


Fig. 5. Cleaning the boiler tank-wagon against residues viscous petroleum products

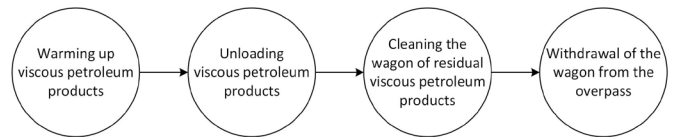


Fig. 6. Most energy-intensive sub-processes of the purification process

Further analysis of the transport process shows that the execution of operations takes time, which is determined empirically and is subject to the normal law of distribution or to the Poisson that is connected to it. From this we get that the constructed Petri network is a stochastic Petri time network [14].

**Formalization of processes.** In Petrie's time stochastic network, markers enter one of the free transfer channels and remain there for a time equal to the time delay of that transition. For decomposed processes, this time is equal to the duration of the sub-process. As a result, we have a sequence of moments of time  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$ , with no events occurring between  $\tau_{j-1}$  and  $\tau_j$ .

Petri time network is defined as set

$$N = \{P, T, F, W, M_0, \theta\},$$

where  $\tau \in \theta: T \rightarrow R_+$  is the function of the response time that compares its response time to each transition, which is the random value for the given model;

$R_+$  is the set of non-negative rational numbers;

$P = \{p_i\}, i = 1, \dots, n$  — finite set of positions;

$T = \{t_j\}, j = 1, \dots, m$  — the finite set of transitions;

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  is the finite set of arcs;

$W: F \rightarrow N$  — arc multiplicity;

$M_0: P \rightarrow Z_+$  — initial marking (condition) of the network;

$Z_+$  is a set of positive integers.

At each time  $\tau$ , the state of Petri's time network is described by the state of its positions and transitions.

The dynamics of the Petri time network will be considered in discrete time intervals. Let's call them a step (by analogy

with a simulation step). Define the state of the time network in  $\tau$  steps as

$$S(\tau) = (S^P(\tau), S^T(\tau)),$$

where  $S^P(\tau)$  — the state of the network positions;  
 $S^T(\tau)$  — the state of the network transitions.

The position of the items can be uniquely defined by marking

$$S^P(\tau) = \{M_p(\tau): M_p(\tau) \in Z_+, p \in P\},$$

which specifies the distribution of the markers by network positions.

Imagine the transition state as the history of their start over a period of time which does not exceed the maximum transition duration

$$S^T(\tau) = \{u_t(\tau - \theta): \theta \in [0, d_\tau - 1], t \in T\},$$

where  $u_t(\tau)$  — the number of transition channels  $t \in T$  started in step  $\tau$ ;

$d_\tau$  — the number of steps after starting the transition. [15, 16].

Denote through

$$D^+(\tau): S^T(\tau_{n-1}) \times S^P(\tau_{n-1}) \rightarrow S^T(\tau_n) \times S^P(\tau_n)$$

the state of the Petri network, which is calculated by the output of the markers from the transition.

Denote in

$$D^-(\tau): S^T(\tau_n) \times S^P(\tau_n) \rightarrow S^T(\tau_n) \times S^P(\tau_n)$$

the transformation of the state of the Petri network, which is synchronized with the input of markers into the transitions.

Because of the fact that the Petri network transitions are multi-channel, it is possible to m-fold the input of markers into the Petri network transitions. Furthermore, m is determined by the achievement of a state of the Petri network in which for none of its transitions the condition for the entry of markers into the transition is met:

$$(D^-)^m(S(t_n)): \forall Z(T, t_n)$$

for many transitions T.

Here is a  $Z(T, t_n)$  — predicate that defines the execution of the condition for the token to enter T at time  $t_n$ .

The operation of the Petri stochastic time network shall then be described by the following system [15]:

$$\begin{cases} t_n = \min \tau_T(t_{n-1}), t_n \geq t_{n-1} \\ S(t_0) = (D^-)^m(S(t_0)) \\ S(t_n) = (D^-)^m(D^+(S(t_{n-1}))), n = 1, 2, \dots \end{cases}$$

The lower level process is linear. It is easily formalized using a mass-service system. However, it is convenient to describe it as a Petri network because the time of each stage is a random amount. Thus, the system of differential equations describing the mass service system would have to be rewritten constantly.

The described stochastic model of the Petrie network is true for any number of positions and transitions. Therefore, it can describe upper and lower level models.

#### SIMULATION OF BITUMEN TRANSPORT

For simulation, the Business Studio platform [17–20] was used as a tool, allowing for functional and cost analysis. BPMN and EPC notations were used in the simulation.

The basic requirements for the carriage of bitumen coincide with the requirements for the carriage of viscous petroleum products. We will ask for it for our task.

The current bitumen production process (fig. 7) is divided into sub-processes.

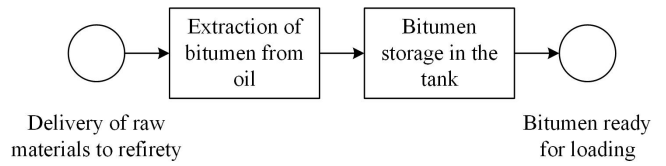


Fig. 7. Production process

The first is the cracking process of oil processing (fig. 8), where the residue is bitumen. It will be treated as a finished product that is stored before loading. During the winter season, the main volumes of refined bitumen are stored at refineries in special storage facilities.

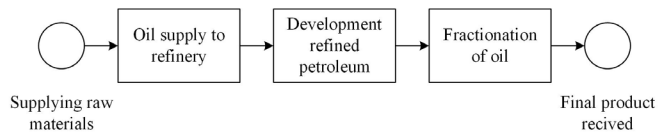


Fig.8. Bitumen

On average, bitumen accumulation and storage lasts six winter months from September to March.

The second process is the direct export of bitumen from the manufacturer and its delivery to the consumer (fig. 9). The transport process includes sub-processes: *Heating bitumen* → *Loading into the wagon* → *Carriage in the heating wagon before unloading in the tank wagon (or bunker wagon)* → *Unloading of the bitumen* → *Transfer to the asphalt factory warehouse*.

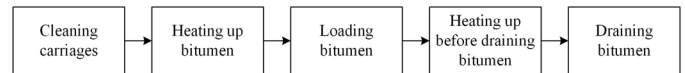


Fig. 9. Bitumen transport process (base model)

The bitumen in the bunker is heated to restore fluidity before loading into the wagon by means of special heating devices for petroleum products with a single capacity of 90 kW for 25 hours in summer and more than 2 days in winter.

The bulk loading of bitumen into bunker-type wagons consists in supplying the wagon to the oil-refining plant's access routes (to the loading point), having previously heated the bitumen, and in delivering the wagon to the dispersion station in order to form a route. During the loading of the bunker-wagons, the bunkers are filled with Bitumen 250 mm slow to the upper edges of the sides. The temperature of the poured bitumen shall not exceed 150 °C.

The bitumen delivery in the bunker-type wagon according to the basic variant is carried out by attaching the wagon to the assembled train station where it is included in the transit train (route), and is delivered to the destination station, where the train is disbanded along the tracks.

The bitumen in the wagon is heated before unloading using steam-heaters. To heat the cargo, steam is fed into the space between the walls of the bunker. The readiness of the bunkers for unloading and the moment when the heating stops shall be de-

terminated by the beginning of the slide of the bitumen adhering to the upper edges of the inner walls of the bunker. Longer heating makes unloading difficult, while heating bitumen until it is fully melted leads to excessive thermal energy consumption and causes long-term standoff of bunker wagons because they are not designed to unload liquid cargo.

The bulk unloading of bitumen from a bunker-type wagon involves disconnecting the wagon from the train, feeding the wagon to the access roads, feeding the bitumen to the heating point (drain), heating the bitumen and unloading the discharge into a bunker of 1-3 thousand tons. The empty wagon is then returned to the loading station and washed of the residual oil product.

When the bitumen is transported in the form of a pellet, the whole process of its manufacture and delivery changes substantially. The difference is in the amount of bitumen heated, energy requirements, time and total costs.

When the DSNB delivery pattern changes, the following operations are changed:

- Bitumen production (fig. 10);
- Bitumen transport process (fig. 11);
- Asphalt concrete preparation.

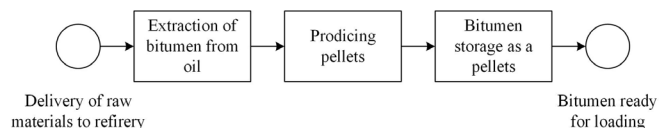


Fig. 10. Bitumen production model in pellets

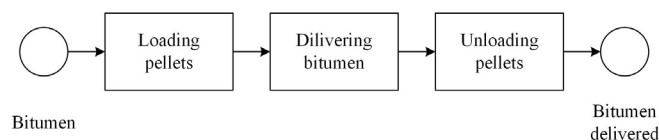


Fig. 11. The process of transporting bitumen in pellets

Perform a functional cost analysis of the transport process. To do so, make the following assumptions:

- average transport distance of 1,647 km;
- average transportation speed of 550 km/day;
- 5 wagons for loading;
- for unloading 3 wagons;
- simulation time is 182 days (October, 01–March, 31);
- revenue rate from petroleum product in 2019 784,8 pp/10t. km;
- one route consists of 45 wagons.

The duration of the transport phases is shown in table 1.

Table 1

Duration of transport phases		
	Basic mode of transport	New mode of transport
One-way transport of cargo	72 hours	72 hours
Loading	9 hours	9 hours
Unloading	210 hours	36 hours

Specifies the properties of the processes with the data of their table 1 as random values.

The bulk of the transport of bitumen occurs during the summer months due to its physical characteristics. For the carriage of bitumen in granules, restrictions can be removed. Therefore, for simulation simulations, consider the period October, 01–March, 31.

The results of the simulation are given in table 2 and table 3. As can be seen, other things being equal, the volume of transport in the test period is doubled by the reduction of the discharge process of the oil product.

Table 2

Linear List of Operations for the Bitumen Transport Process (Basic Method)

Number of implementations	Process	Average duration	Total total time
12	A2.4 Bitumen loading	32 850	394 200
12	A2.5 Bitumen delivery	272 800	3 273 600
12	A2.7 Bitumen unloading	753 050	9 036 600
11	A2.8 Return of train to the dispatching station	270 327,2727	3 020 400

Table 3

Linear List of Operations for the Bitumen Granule Transport Process (new)

Number of implementations	Process	Average duration	Total total time
24	A2.1 Pellets loading	32 850	788 400
23	A2.2 Bitumen delivery	253 226,087	5 850 600
23	A2.3 Pellets unloading	129 469,5652	2 977 800
23	A2.4 Return of train to the dispatching station	264 965,2174	6 094 200

*Adequacy of the model.* To this end, we shall compare the number of revolutions of wagons according to the new  $N_{turnover}^{(2)}$  and the basic  $N_{turnover}^{(1)}$  variants according to the formula:

$$\frac{N_{turnover}^{(2)}}{N_{turnover}^{(1)}} = \frac{T_{turnover}^{(1)}}{T_{turnover}^{(2)}}$$

So:

$$N_{turnover}^{(2)} = N_{turnover}^{(1)} \frac{T_{turnover}^{(1)}}{T_{turnover}^{(2)}}$$

where  $T_{turnover}^{(1)}$  — existing time per wagon on the base variant, days;

$T_{turnover}^{(2)}$  — estimated time of a new version of the wagon, days.

So

$$N_{turnover}^{(i)} = \frac{T}{T_{turnover}^{(i)}}$$

where  $T = 182,5$  — number of days in six months (for Central and Southern Territory of European Russia);  $T = 227,5$  — two hundred and twenty-seven and a half days (North, Siberia and Far East).

$$T_{\text{turnover}}^{(2)} = T_{\text{turnover}}^{(1)} - \Delta T_{\text{turnover}} = T_{\text{turnover}}^{(1)} - 10 \text{ (hours)},$$

where  $\Delta T_{06} = 10$  hours — reduction in one turnover due to reduction in slotting times.

Turnover time of one route determined by components

$$T_{\text{turnover}} = 2T_{\text{tr}}^{(i)} + T_c^{(\delta)} + T_{\text{st}}^{(i)},$$

where  $T_{\text{tr}}^{(i)}$  — freight time at one end (for European part of Russia);  $T_c^{(\delta)}$  — loading time of one train wagon;  $T_{\text{st}}^{(i)}$  — time of unloading of a wagon of one train.

The last two parameters are defined by the formulas:

$$T_c^{(\delta)} = \left(\frac{N_n}{N_{\text{cn}}}\right) T_{\text{cn}}^{(\delta)},$$

$$T_{\text{st}}^{(i)} = \left(\frac{N_n}{N_{\text{ct}}}\right) T_{\text{ct}}^{(i)},$$

where  $N_n$  — number of wagons simultaneously supplied for loading;  $N_{\text{cn}}$  — number of wagons being unloaded simultaneously;  $T_{\text{ct}}^{(i)}$  — corresponding loading time of the product in one wagon, days.

According to assumptions  $N_{\text{cn}} = 5$  wagons и  $N_{\text{ct}} = 3$  wagons.

Given the extra surgeries, we can put that:  $T_{\text{cn}}^{(\delta)} = 1$  hour = = 0,042 day; then  $T_{\text{ct}}^1 = 14$  hour = 0,583 day and  $T_{\text{ct}}^2 = 4$  hour = = 0,167 day.

The loading time of the wagon according to the basic and new versions is the same and is 0,378 day.

Time of unloading of one route, base and new options:

- base variant:

$$T_{\text{st}}^{(1)} = \frac{45}{3} \times 0,583 = 8,75 \text{ days};$$

- new variant:

$$T_{\text{st}}^{(2)} = \frac{45}{5} \times 0,167 = 1,5 \text{ days}.$$

The difference in unloading time between the basic and the new variant is equal:

$$T_{\text{st}}^{(1)} - T_{\text{st}}^{(2)} = 8,75 - 1,5 = 7,25 \text{ days}.$$

Find the time to turn one train.

- base variant:

$$T_{\text{turnover}}^{(1)} = 2 \times 3 + 0,378 + 8,75 = 15,128 \text{ days};$$

- new variant:

$$T_{\text{turnover}}^{(1)} = 2 \times 3 + 0,378 + 1,5 = 7,878 \text{ days}.$$

Then reducing the turnaround time of one route of 45 wagons is

$$\Delta T_{\text{turnover}} = \left(\frac{N_n}{N_{\text{ct}}}\right) \times (T_{\text{ct}}^{(1)} - T_{\text{ct}}^{(2)}) \times \frac{N_n}{N_{\text{ct}}} \times \Delta T_{\text{ct}} \times \frac{45}{5} \times 10 = 3,48 \text{ days}.$$

Based on the above, we find that the turnover of one route of 45 wagons per six months per year is:

- base variant:  $N_{\text{turnover}}^{(1)} = \frac{182,5}{15,128} = 12,06 \approx 13$  rotations;
- new variant:  $N_{\text{turnover}}^{(2)} = \frac{182,5}{7,878} = 23,16 \approx 24$  rotations.

The results are fully consistent with the simulation results, indicating the adequacy of the model constructed.

Assessment of the economic impact. In the six months following the cold season in Russia, one route of 45 wagons will carry bitumen according to basic and new options:

- base variant:

$$Q^{(1)} = Q_n^{(1)} \times N_n \times N_{\text{turnover}}^{(1)} = 60 \times 45 \times 12,06 = 32\,562 \text{ tons};$$

- new variant:

$$Q^{(2)} = Q_n^{(2)} \times N_n \times N_{\text{turnover}}^{(2)} = 66 \times 45 \times 23,16 = 68\,785,2 \text{ tons},$$

where  $Q^{(i)}$  — 6 months of bitumen transport per ton per route per base and new option;  $Q_n^{(i)}$  — volume of goods per wagon according to base and new variant;  $N_n$  — number of wagons;  $N_{\text{turnover}}^{(i)}$  — number of route revolutions per test period according to base and new variant.

Average (unit) income per unit of petroleum product transport (profit rate di) is 784,8 penny per 10 000 km. It is defined as the ratio of the carriage board to the net freight turnover, which is defined as the product of the quantity of the goods carried (t) and the distance (km). Calculate tray  $C^i$  for base and new for test period

$$C^1 = 32562 \times 1647 \times 0,07848 = 4\,208\,852,106,$$

$$C^2 = 68785,2 \times 1647 \times 0,07848 = 8\,890\,938,33.$$

It is not difficult to see that the difference of the freight charges between the basic mode of transport and the new one per year will be in the order of 9 million rubles.

#### CONCLUSION

1. A new model for the carriage of bitumen is proposed, which makes it possible to exclude empty wagon runs and allows for the possibility of multimodal transport (containerized transport).

2. A system of mathematical models of the process of transport and discharge of viscous petroleum products has been constructed. This was the first use of the Russian Business Studio, previously used to model production business processes.

3. A functional cost analysis is carried out, which makes it possible to assess the economic effect of the proposed new ways of transporting viscous petroleum products. The difference between the bitumen charge for the basic mode of transport and the new one per year will be of the order of 9 million rubles per train (loading train).

#### REFERENCES

1. Transportation and storage of high-viscosity oils and oil products. Application of electric heating: Monography [Transport i khranenie vysokovyazkikh neftey i nefteproduktov. Primenenie elektropodogreva: Monografiya] /R. N. Bakh-tizin, A. K. Galyamov, B. N. Mastobaev, [et al.]. — Moscow: Chemistry, 2004. — 195 p.
2. Konnova, G. V. Transport equipment and storage of oil and gas: Study guide for universities [Oborudovanie transporta i khranenie nefi i gaza: Uchebnoe posobie dlya vuzov]. — Rostov-on-Don: Feniks, 2006. — 128 p.

3. Rail Transportation. Information and reference portal [Информационно-справочный портал «Железнодорожные перевозки»] Available at: <http://www.cargo-report.info> (accessed: 02 Dec 2020).

4. Zhebanov, A. V. Actual Problems of Transportation of Viscous and Solidifying Petroleum Products by Railway Transport [Актуальные задачи транспортировки вязких и затвердевающих нефтепродуктов на железнодорожном транспорте] / A. V. Zhebanov, D. B. Volov // Actual Problems of Transport Complex Development: Materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference [Актуальные проблемы развития транспортного комплекса: материалы V Всероссийской научно-практической конференции] (Samara, Russia, February 25–27, 2009). — Samara: Samara State Transport University, 2009. — Pp. 364–366.

5. Zhebanov, A. V. Management of Heat-Physical Processes in Oil Products During Their Transportation in a Heat-Insulated Tank [Управление тепловыми процессами в нефтепродуктах при их перевозках в теплоизолированном вагоне]: diss. on competition of a scientific degree PhD (Engin.). — St. Petersburg: PSTU, 2017. — 129 p.

6. Moiseev, V. I. Theory and Models of Heat-Mass Transfer Processes in Transport Operations with Solidified Liquid Cargoes [Теория и модели процессов теплообмена при транспортировке с застывающими наливными грузами]: diss. on competition of a scientific degree Grand PhD (Engin.). — St. Petersburg: PSTU, 2012. — 463 p.

7. Moiseev, V. I. Cooling of Hot Petroleum Products in Tanks with a Steam Heater Casing [Охлаждение горячих нефтепродуктов в цистернах с парогревателем кожухом] // Mathematics in Higher Education: Proceedings of the XXII International Scientific and Methodological Conference [Математика в вузе: сборник трудов XXII Международной научно-методической конференции] (Petrozavodsk, Russia, June 02–03, 2010). — Saint Petersburg: PSTU, 2017. — Pp. 128–132.

8. Kandaurov, I. I. The mechanics of granular media and its application in construction [Механика зернистых сред и ее применение в строительстве]. — Leningrad [Saint Petersburg]; Moscow: Stroyizdat, 1966. — 319 p.

9. Missenard, A. Conductivité thermique des solides, liquides, gaz et de leurs mélanges. Par André Missenard [Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций]. — Moscow, Mir Publishers, 1968. — 464 p.

10. Veren'ko, V. A. Road composite materials. Structure and mechanical properties. [Дорожные композиционные материалы. Структура и механические свойства]. — Minsk: Nauka i tekhnika Publishing House, 1993. — 246 p.

11. Ryabukhin, S. I. Application of Petri Nets for Modeling Event-Process Goals and Building Database Structures [Применение сетей Петри для моделирования событийно-процессных целей и построения структур базы данных] // Vestnik Novosi-

birsk State University. Series: Information Technologies [Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии]. 2013. Vol. 11, Is. 4. Pp. 92–101.

12. Karpova, T. S. Simulation of the Operation of an Oil Loading Terminal for Viscous Petroleum Products [Моделирование работы нефтеналивного терминала для вязких нефтепродуктов] / T. S. Karpova, V. I. Moiseev, V. A. Ksenofontova // Transportation Systems and Technology [Транспортные системы и технологии]. 2020. Vol. 6, No. 3. Pp. 60–75. DOI: 10.17816/transsyst20206360-75.

13. Dorrer, M. G. Algorithm for Transforming Models of Business Processes into Monochrome Petri Nets [Алгоритм преобразования моделей бизнес-процессов в одноцветные сети Петри] // Modeling and Analysis of Information Systems [Моделирование и анализ информационных систем]. 2010. Vol.17, No. 2. Pp. 5–16.

14. GOST G-14540. Standard process for loading and unloading railway stations and cleaning and preparation of tanks for the carriage of goods [GOST G-14540 Типовой технологический процесс работы железнодорожных станций по наливу и сливу нефтегрузов и промывочно-пропарочных предприятий по очистке и подготовке цистерн под перевозку грузов]. — Moscow: Transport Publishers, 1982. — 72 p.

15. Zaytsev, D. A. Invariants of Timed Petri Nets [Инварианты временных сетей Петри] // Cybernetics and System Analysis [Кибернетика и системный анализ]. 2004. No. 2. Pp. 92–106.

16. Tarasyuk, I. V. Stochastic Petri Nets — A Formalism for Modeling and Analyzing the Performance of Computational Processes [Стохастические сети Петри — формализм для моделирования и анализа производительности вычислительных процессов] // Formal Methods and Models of Computer Science [Формальные методы и модели информатики]. — Novosibirsk: Nauka Publishers, 2004. — Pp. 135–194.

17. Stetsenko, I. V. Theoretical Foundations of Petri-Object Modeling of Systems [Теоретические основы моделирования систем] // Mathematical Machines and Systems [Математические машины и системы]. 2011. No. 4. Pp. 136–148.

18. Business Studio. Available at: <http://www.businessstudio.ru> (accessed: 02 Dec 2020).

19. Moiseev, V. I. Construction of the Simulation Model of Transportation Oil Products / V. I. Moiseev, T. S. Karpova, V. A. Ksenofontova // Proceedings of Models and Methods of Information Systems Research Workshop 2019 (MMISR 2019) (St. Petersburg, Russia, December 04–05, 2019). CEUR Workshop Proceedings. 2020. Vol. 2556. Pp. 103–107. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2556/paper18.pdf> (accessed: 02 Dec 2020).

20. Lolips [Lolips]. Certificate of State registration of a computer program RU No. 2019666553 / V. A. Ksenovontova, T. S. Karpova, V. I. Moiseev. Published at December 11, 2019.

# Анализ применения нового способа перевозки нефтебитума для дорожно-строительных работ по железной дороге

В. А. Ксенофонтова

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I  
Санкт-Петербург, Россия  
koc-vera@yandex.ru

**Аннотация.** Нефтебитум является одним из основных составляющих компонентов асфальта. Для него, как и для других вязких нефтепродуктов, характерны потеря текучести в процессе транспортировки при низких температурах окружающей среды. В работе предложен новый способ перевозки дорожного нефтебитума как насыпного груза в виде pellets с защитной оболочкой, предотвращающей слипание, и являющейся составной частью асфальтобетона. Подробно рассмотрен процесс транспортировки вязких нефтепродуктов. Построена система математических моделей процесса транспортировки вязких нефтепродуктов с последующим проведением имитационного моделирования и функционально-стоимостного анализа.

**Ключевые слова:** нефтебитум, железнодорожные перевозки, математическая модель, имитационная модель, вязкие нефтепродукты, бизнес-процесс, сеть Петри.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Транспорт и хранение высоковязких нефтей и нефтепродуктов. Применение электроподогрева: Монография / Р. Н. Бахтизин, А. К. Галлямов, Б. Н. Мастобаев [и др.]. — Москва: Химия, 2004. — 195 с.
2. Коннова, Г. В. Оборудование транспорта и хранение нефти и газа: учебное пособие для вузов. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. — 128 с. — (Высшее образование).
3. Информационно-справочный портал «Железнодорожные перевозки». Статистика — Справочники — Дислокация — Консультации. URL: <http://www.cargo-report.info> (дата обращения: 02.12.2020).
4. Жебанов, А. В. Актуальные задачи транспортировки вязких и затвердевающих нефтепродуктов на железнодорожном транспорте / А. В. Жебанов, Д. Б. Волов // Актуальные проблемы развития транспортного комплекса: материалы V Всероссийской научно-практической конференции (Самара, 25–27 февраля 2009 г.). — Самара: СамГУПС, 2009. — С. 364–366.
5. Жебанов, А. В. Управление теплофизическими процессами в нефтепродуктах при их перевозках в теплоизолированном вагоне: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.22.07. — Санкт-Петербург: ПГУПС, 2017. — 129 с.
6. Моисеев, В. И. Теория и модели процессов тепломассопереноса при транспортных операциях с застывающими наливными грузами: дис. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук: 05.13.18. — Санкт-Петербург: ПГУПС, 2012. — 463 с.
7. Моисеев, В. И. Охлаждение горячих нефтепродуктов в цистернах с паробогривательным кожухом // Математика в вузе: сборник трудов XXII Международной научно-методической конференции (Петрозаводск, 02–03 июня 2010 г.). — Санкт-Петербург: ПГУПС, 2010. — С. 128–132.
8. Кандауров, И. И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. — Ленинград [Санкт-Петербург]; Москва: Стройиздат. Ленинградское отделение, 1966. — 319 с.
9. Миснар, А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиции = Conductivite' thermique des solides, liquides, gaz et de leurs m $\acute{e}$ langes. Par Andr $\acute{e}$  Missenard / Пер. с фр. М. Г. Беды [и др.]. — Москва: Мир, 1968. — 464 с.
10. Веренько, В. А. Дорожные композитные материалы. Структура и механические свойства / Под ред. И. И. Леонovicha. — Минск: Навука і тэхніка, 1993. — 246 с.
11. Рябухин, С. И. Применение сетей Петри для моделирования событийно-процессных цепей и построения структур базы данных // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2013. Т. 11, Вып. 4. С. 92–101.
12. Карпова, Т. С. Моделирование работы нефтеналивного терминала для вязких нефтепродуктов / Т. С. Карпова, В. И. Моисеев, В. А. Ксенофонтова // Транспортные системы и технологии. 2020. Т. 6, № 3. С. 60–75. DOI: 10.17816/transsyst20206360-75.
13. Доррер, М. Г. Алгоритм преобразования моделей бизнес-процессов в одноцветные сети Петри // Моделирование и анализ информационных систем. 2010. Т. 17, № 2. С. 5–16.
14. ГОСТ Г-14540. Типовой технологический процесс работы железнодорожных станций по наливу и сливу нефтегрузов и промывочно-пропарочных предприятий по очистке и подготовке цистерн под перевозку грузов. — Москва: Транспорт, 1982. — 72 с.
15. Зайцев, Д. А. Инварианты временных сетей Петри // Кибернетика и системный анализ. 2004. № 2. С. 92–106.
16. Тарасюк, И. В. Стохастические сети Петри — формализм для моделирования и анализа производительности вычислительных процессов // Формальные методы и модели информатики / Под ред. А. Г. Марчука. — Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 2004. — С. 135–194. — (Системная информатика: сборник научных трудов; вып. 9).
17. Стеценко, И. В. Теоретические основы Петри-объектного моделирования систем // Математичні машини і системи. 2011. № 4. С. 136–148.

18. Business Studio: управление бизнесом, бизнес-моделирование, описание, регламентация и оптимизация бизнес-процессов. URL: <http://www.businessstudio.ru> (дата обращения: 02.12.2020).

19. Moiseev, V. I. Construction of the Simulation Model of Transportation Oil Products / V. I. Moiseev, T. S. Karpova, V. A. Ksenofontova // Proceedings of Models and Methods of Information Systems Research Workshop 2019 (MMISR 2019) (St. Petersburg, Russia, 04–05 December 2019). CEUR Workshop Proceedings. 2020. Vol. 2556. Pp. 103–107.

URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2556/paper18.pdf> (дата обращения: 02.12.2020).

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666553 Российская Федерация. Лолипс: № 2019665265: заявл. 26.11.2019; опублик. 11.12.2019 / В. А. Ксенофонтова, Т. С. Карпова, В. И. Моисеев; заявитель ФГБОУ ВО ПГУПС. — 1 с.