

*Intellectual Technologies  
on Transport  
No 4*



*Интеллектуальные технологии  
на транспорте  
№ 4*

*Санкт-Петербург  
St. Petersburg  
2022*

**Интеллектуальные технологии на транспорте  
(сетевой электронный научный журнал)**

**№ 4, 2022**

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., зам. ген. директора по ИТ 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., зам. ген. дир. «Газинформсервис»,  
С.-Петербург, РФ  
Титова Т. С., проф., проректор ПГУПС,  
С.-Петербург, РФ  
Федоров А. Р., ген. дир. «Digital Design», С.-Петербург, РФ  
Юсупов Р. М., проф., чл.-корр. РАН, С.-Петербург, РФ

---

**Редакционная коллегия**

Бубнов В. П., проф., С.-Петербург, РФ –  
заместитель главного редактора  
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  
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  
Хабаров В. И., проф., Новосибирск, РФ  
Ходаковский В. А., проф., С.-Петербург, РФ  
Ху Фу-Ниан, проф., Суйчжоу, Китай  
Чехонин К. А., проф., Хабаровск, РФ  
Ялышев Ю. И., проф., Екатеринбург, РФ

---

**Адрес редакции:**

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

e-mail: itt-pgups@yandex.ru

Телефон: +7 (812) 457-86-06

---

Сетевое издание «Интеллектуальные технологии на транспорте (сетевой электронный научный журнал),  
Intellectual Technologies on Transport» зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий 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», 2022

# Intellectual Technologies on Transport

## Issue 4, 2022

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 St. Petersburg State Transport University»

---

### Editor-in-Chief

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

### Co-chairs of the Editorial Council

Panychev A. Y., rector of PSTU, St. Petersburg, Russia  
Charkin E. I., CIO of JSC «Russian Railways», Moscow, Russia

---

### Editorial Council Members

Adadurov S. E., 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., Deputy CEO at «Gazinformservice» Ltd.,  
St. Petersburg, Russia  
Titova T. S., Prof., Vice-Rector, 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  
Kanaev A. K., Prof., St. Petersburg, Russia  
Kotenko A. G., Dr. Sc., As. Prof., St. Petersburg, Russia  
Kurenkov P. V., Prof., Moscow, Russia  
Letsky E. K., 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 E. A., Dr. Sc., As. Prof., St. Petersburg, Russia  
Okhtilev 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  
Khabarov V. I., Prof., Novosibirsk, Russia  
Khodakovskiy V. A., Prof., St. Petersburg, Russia  
Hu Fu-Nian, Prof., Xuzhou, China  
Chekhonin K. A., Prof., Khabarovsk, Russia  
Yalyshev Y. I., Prof., Ekaterinburg, Russia

---

### Editorial address:

190031, St. Petersburg, Moskovsky ave., 9  
e-mail: [itt-pgups@yandex.ru](mailto:itt-pgups@yandex.ru)  
Phone: +7 812 457 86 06

---

The online journal «Intellectual Technologies on Transport» is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technologies, and Mass Media.  
EI 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.

© Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University», 2022

## Содержание

<i>Баушев А. Н., Семёнова О. Л.</i> Алгоритм многокритериальной оптимальной маршрутизации (на англ.) .....	7
<i>Дурницын О. А.</i> Оптимизация скорости для снижения времени транспортировки и расхода топлива автобетоносмесителей .....	13
<i>Большаков М. А.</i> Применение факторного анализа для снижения размерности исходных данных мониторинга ИТ-инфраструктуры .....	17
<i>Крылов М. А., Забродин А. В.</i> Когнитивность как фактор сложности разработки обучающих систем .....	24
<i>Куранова О. Н., Дергачёв А. И., Кожевников А. И., Петрова О. В., Носонов В. И.</i> Обоснование экономической эффективности дистанционного обучения на основе дорожного центра обучения при вузе .....	30
<i>Доклады, представленные на международном семинаре «Модели информационных систем на транспорте и методы их решения» на базе кафедр «Информационные и вычислительные системы» и «Высшая математика». Санкт-Петербург, Россия. 09–10 декабря 2021 г.</i>	
<i>Проурзин В. А., Проурзин О. В.</i> Методы анализа больших данных надежности восстанавливаемых систем (на англ.) .....	36
<i>Фоменко В. Н., Гарбарук В. В.</i> Модуль образовательной программы для дистанционного обучения (на англ.) .....	41
<i>Лохвицкий В. А., Гончаренко В. А., Левчик Э. С.</i> Модель масштабируемого микросервиса на основе системы массового обслуживания с «охлаждением» (на англ.) .....	46
<i>Кустов В. Н., Грохотов А. И., Головков Е. В.</i> Программная модель маскировки скрытого сообщения в задачах стеганографии (на англ.) .....	52

*Мочалов А. В., Палагин Ю. И., Иванова Н. В., Руохомаа Х.*

Логистическая цифровая экосистема сети мультимодальных грузовых терминалов (на англ.) ..... 64

*Смагин В. А., Бубнов В. П., Бараусов Д. В.*

Повышение надежности электронных элементов на основе объемного резервирования (на англ.) ..... 71

*Соколов С. С., Данилин Г. В., Кныш Т. П.*

Построение математических моделей для разработки программного обеспечения систем управления безэкипажными судами (на англ.) ..... 78

*Цымай Ю. В., Нырков А. П., Кардакова М. В.*

Управление техническими системами с помощью нейроинтерфейса (на англ.) ..... 85

*Соколов С. С., Губернаторов О. Н., Егорова Е. К.*

Автономные технические средства — инструмент обнаружения нарушителя транспортной безопасности (на англ.) ..... 94

# Contents

<i>Baushev A. N., Semenova O. L.</i> On the Multi-Criteria Routing Algorithm (in English) .....	7
<i>Durnitsin O. A.</i> Speed Optimization to Reduce Transportation Time and Fuel Consumption of Concrete Mixers Truck .....	13
<i>Bolshakov M. A.</i> Analysis to Reduce the Dimensionality of Initial IT Infrastructure Monitoring Data .....	17
<i>Krylov M. A., Zabrodin A. V.</i> Cognitiveness as a Factor in the Complexity of Developing Learning Systems .....	24
<i>Kuranova O. N., Dergachev A. I., Kozhevnikov A. I., Petrova O. V., Nosonov V. I.</i> Substantiation of the Economic Efficiency of Distance Learning Based on the Road Training Center at the University .....	30
<i>Reports presented at the Models of Information Systems in Transport and Methods for Their Solution Workshop on the basis of the departments «Information and Computer Systems» and «Higher Mathematics». St. Petersburg, Russian Federation, December 09–10, 2021.</i>	
<i>Prouzrin V. A., Prouzrin O. V.</i> Methods for Big Data Analysis of Reliability of Recoverable Systems (in English) .....	36
<i>Fomenko V. N., Garbaruk V. V.</i> A Module of Educational Program for Distance Learning (in English) .....	41
<i>Lokhvitsky V. A., Goncharenko V. A., Levchik E. S.</i> A Scalable Microservice Model Based on a Queuing System with «Cooling» (in English) .....	46
<i>Kustov V. N., Grokhotov A. I., Golovkov E. V.</i> A Software Model of Masking Hidden Message in Steganography Tasks (in English) .....	52
<i>Mochalov A. V., Palagin Yu. I., Ivanova N. V., Ruohomaa H.</i> Logistic Digital Ecosystem of the Multimodal Freight Terminal Networks (in English) .....	64

*Smagin V. A., Bubnov V. P., Barausov D. V.*

Improving the Reliability of Electronic Elements Based on Volumetric Redundancy (in English) ..... 71

*Sokolov S. S., Danilin G. V., Knysh T. P.*

Mathematical Models for Software Development of Control Systems for Unmanned  
Vessels (in English) ..... 78

*Tsymay Yu. V., Nyrkov A. P., Kardakova M. V.*

Neurointerface Modeling for Controlling Dynamic Systems (in English) ..... 85

*Sokolov S. S., Gubernatorov O. N., Egorova E. K.*

Autonomous Technical Means — a Tool of a Transport Security Violator (in English) ..... 94

# On the Multi-Criteria Routing Algorithm

PhD A. N. Baushev  
Emperor Alexander I St. Petersburg  
State Transport University  
Saint Petersburg, Russia  
baushev@pgups.ru

PhD O. L. Semenova  
Saint Petersburg State University  
Saint Petersburg, Russia  
o\_semenova@mail.ru

**Abstract.** The article focuses on the description of the method of constructing a set of admissible routes in transport networks in the cases when there are given constraints on the individual tracks of transported objects. The constraints have a form of upper bounds on two weights and on the lengths of searched paths. We analyze and estimate the computational complexity of the proposed algorithm and consider the case when the weights are independently drawn from a given continuous distribution with independent components.

**Keywords:** transport networks, optimal routing, Pareto set, records in a sequence of random variables, random permutations.

## INTRODUCTION

Optimal routing problems are an integral part of the field of developing and managing transport networks. Since appearance the first algorithms for searching the shortest path in a weighted graph [1–3] the problem

$$w(\mu) \rightarrow \min, \quad \mu \in \mathcal{M}(s, t) \quad (1)$$

where  $\mathcal{M}(s, t)$  denotes the set of all simple paths from vertex  $s$  to vertex  $t$  in a directed weighted graph  $G_w$ , has been repeatedly considered, both from the viewpoint of the development of computing and telecommunications technologies, and from the viewpoint of new algorithmic ideas [4].

In a wide class of optimal routing problems, the models are formulated as (1) under additional constraints of the form

$$w_1(\mu) \leq W_1, \dots, w_d(\mu) \leq W_d, \quad (2)$$

where  $w_1, \dots, w_d$  are some given weights and  $W_1, \dots, W_d$  are given corresponding upper bounds [5]. (Simplest example is the problem of road routing in which  $w$  performs the cost of fuel and  $w_1$  performs the cost of time (duration),  $d = 1$ .)

However, even in the case  $d = 1$ , the problem becomes NP-hard [6]. Due to this fact, a large number of papers has appeared on the search for algorithms for approximate solution of the problem (1)–(2) that would be online-implementable.

**Comment.** There is no precise definition of «online-implementable algorithm». We believe that when dealing with big data an algorithm can currently be considered as *online-implementable* if its computational complexity admits an estimate of the form,  $O(nL(n))$ , where  $L(\cdot)$  is some function, slowly varying at infinity, and  $n$  is proportional to the number of input bits.

At the same time if the routing problem under consideration has not the type of online controlling the process of transportation one can use more «heavy» algorithms to find the exact solution (1)–(2).

NP-hard problems are very different from each other from the viewpoint of the dependence the necessary resources (time

and memory) for the known exact algorithms on the size of inputs. For some kind of NP-hard problems, such as Knapsack Problem, there are known pseudo-polynomial algorithms of exact solution<sup>1</sup> [7]. Such problems are called *weakly* NP-hard and often can be effectively solved in practice for rather large range of values of parameters determining the size of the problem.

As it was shown in [6] the problem (1)–(2) is relates to the last type of problems also. In the proposed method, the problem (1)–(2) was reduced to the problem of constructing the Pareto set for the set

$$\{(w(\mu), w_1(\mu), \dots, w_d(\mu)) \mid \mu \in \mathcal{M}(s, t), w_1(\mu) \leq W_1, \dots, w_d(\mu) \leq W_d\}.$$

The theme of constructing the Pareto sets is very popular in the field of multi-criteria problems [5, 6, 8–13] and the related problems splits into two classes in dependence on finiteness or infiniteness the number of points of an original set. We will deal with finite original set and use corresponding terminology [14], which is slightly different from the terminology for the case when the original set is determined as subset of  $\mathbb{R}^{d+1}$  consisted of points satisfying given analytical relations.

Till now we concerned the models of routing problems relatively to individual tracks over a transport network. New problem appears when one has to transport over the net a set  $F = \{f\}$  of some objects if the capacity of the transport network is bounded and the transportation must be done under the constraints of the form

$$w_1(f|\mu) \leq W_1(f), \dots, w_d(f|\mu) \leq W_d(f) \quad (3)$$

for every transported object  $f \in F$ .

Our approach to this problem includes two steps.

On the first step we form a queue of transported object from the set  $F$ .

On the second step we by means of an iteration procedure retrieving an item  $f$  from the queue (in accordance with the FIFO discipline), construct corresponding Pareto set for the set  $\mathcal{M}(s, t)$  under conditions (3), and choose from this set a path in a such way to maximize the residual capacity of the origin network.

Note that although it is easy to construct an artificial example in which the Pareto set coincides with the set  $\mathcal{M}(s, t)$ , in typical situations the Pareto set is significantly smaller than the origin set [14].

## PRELIMINATERIES

Let  $G$  be a directed strongly connected graph representing some transport network,  $V = V(G)$  be its set of vertices and  $E = E(G)$  be its set of edges (arcs).

<sup>1</sup>An algorithm is called *pseudo-polynomial* if its computational complexity admits the estimation by a polynomial from several numeric parameters characterizing size of the problem.



Let  $F = \{f\}$  be the set of objects to be transported over  $G$ . We suppose that for every  $f \in F$  and for every  $e \in E$  two weights connected with moving  $f$  along the arc  $e$  are given: the weight  $c(f|e)$  representing the transport costs, and the weight  $\tau(f|e)$  representing the time costs (duration of transportation).

In addition, for every  $f \in F$ , the upper bound of the total transport costs  $C(f)$ , the upper bound of the total time costs  $\mathcal{T}(f)$ , start vertex  $s(f) \in V$ , and terminal vertex  $t(f) \in V$  are given.

Let  $\mathcal{M}$  be the set of all simple paths in  $G$ . A path  $\mu \in \mathcal{M}$  we will represent as the sequence (called *track*) of vertices:

$$\mu: s \equiv v_{i_0} \rightarrow v_{i_1} \rightarrow \dots \rightarrow v_{i_{k-1}} \rightarrow v_{i_k} \equiv t. \quad (4)$$

The initial and end vertices of the path  $\mu$  are correspondingly denoted by  $s(\mu)$  and  $t(\mu)$ . The sets of vertices and arcs entering the path  $\mu$  are correspondingly denoted by  $V(\mu)$  and  $E(\mu)$ . The number of elements of  $E(\mu)$  ( $\#E(\mu)$ ) is called *length* of the path  $\mu$  and is denoted by  $L(\mu)$ .

Denote by  $c(f|\mu)$  and by  $\tau(f|\mu)$  correspondingly the total transport costs and the total time costs under the condition that for transportation  $f$  was used the path  $\mu$ .

We postulate the following relations:

$$c(f|\mu) = \sum_{j=0}^{k-1} c(f|\mu_j) \quad (5)$$

and

$$\tau(f|\mu) = \sum_{j=0}^{k-1} \tau(f|\mu_j), \quad (6)$$

where  $\mu_j: v_{i_j} \rightarrow v_{i_{j+1}}, j = 0, 1, \dots, k-1$ . Fulfillment of these relations for every  $f \in F$  and every  $\mu \in \mathcal{M}$  is called the *axiom of costs additivity*. This axiom is the basis for the algorithms of this article.

Let  $f \in F$  be fixed,  $\mu_1, \mu_2 \in \mathcal{M}$ . We will say that path  $\mu_1$  is *not worse* ( $\preceq_f$  — not worse) than path  $\mu_2$  and denote this binary relation by the symbol  $\preceq_f$ , if the following conditions are fulfilled.

- 1)  $s(f) = s(\mu_1) = s(\mu_2)$  &  $t(f) = t(\mu_1) = t(\mu_2)$ ;
- 2)  $c(f|\mu_1) \leq c(f|\mu_2)$ ;
- 3)  $\tau(\mu_1) \leq \tau(\mu_2)$ .

We will say that path  $\mu_1$  is  $\preceq_f$ -*better* than path  $\mu_2$  and write  $\mu_1 \prec_f \mu_2$ , if  $\mu_1 \preceq_f \mu_2$  and at least one of the inequalities 2) – 3) is strict. Finally, we will say that paths  $\mu_1$  and  $\mu_2$  are  $\preceq_f$ -*equivalent* and write  $\mu_1 \sim_f \mu_2$ , if  $\mu_1 \preceq_f \mu_2$  &  $\mu_2 \preceq_f \mu_1$ , that is, 1) is fulfilled and inequalities 2) – 3) turn into equalities. The relation  $\preceq_f$  sets the partial order on  $\mathcal{M}$ .

Let  $\Gamma \subset \mathcal{M}$ . The set  $\text{Min}(\Gamma) = \{\gamma \in \Gamma \mid \nexists \gamma' \in \Gamma: \gamma' \prec_f \gamma\}$  is called the *set of minimal elements* of  $\Gamma$  or the *Pareto set* or the *Pareto frontier* (for the set  $\Gamma$ ) relatively to criteria of transport costs and time costs.

The map  $\varphi: \Gamma \rightarrow \text{Min}(\Gamma)$  is called the *filtration* of the subsets of  $\mathcal{M}$  by the relation  $\preceq_f$ . A set  $\Gamma$  is called  $\varphi$ -*filtered* if  $\Gamma = \varphi(\Gamma)$ .

Let the vertices  $s$  and  $t$  be fixed from now and consider the set  $\mathcal{M}(s, t) = \{\mu \in \mathcal{M} \mid s(\mu) = s, t(\mu) = t\}$ . The condition 1) is fulfilled for every  $\mu_1, \mu_2 \in \mathcal{M}(s, t)$ .

Let  $\Gamma \subset \mathcal{M}(s, t), \#\Gamma = n$ , and a sequence  $(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n)$  enumerates the elements of  $\Gamma$  in a such way that the condition

$$c(f|\gamma_1) \leq c(f|\gamma_2) \leq \dots \leq c(f|\gamma_n) \quad (7)$$

be fulfilled.

It is easy to verify the validity of the following statement.

**Proposition 1.** In order for the set  $\Gamma$  to be  $\varphi$ -filtered, the following conditions are necessary and sufficient:

$$a) \tau(f|\gamma_1) \geq \tau(f|\gamma_2) \geq \dots \geq \tau(f|\gamma_n); \quad (8)$$

b) the strict inequalities or equalities are fulfilling in (7) and (8) simultaneously.

Based on Proposition 1, one can easily construct an algorithm for constructing the  $\varphi$ -filtration of the union of two  $\varphi$ -filtered sets of paths if these sets are presented in a form satisfying the conditions of Proposition 1. At the first step of such algorithm the corresponding sequences of weights are merged over  $c$ -coordinate. This procedure is fully analogous to standard *merge* procedure of merging two sorted arrays into one [15]. At the second step, the obtained sequence of weights is scanned and the elements (and corresponding paths) that violate conditions (a) or (b) of Proposition 1 are deleted. The computational complexity of such algorithm is  $O(n + m)$ , where  $n$  and  $m$  are the cardinalities of combined sets.

In what follows, the procedure that implements this algorithm will be denoted by UFILTR, and the appeal to it will be written in the form

$$\Gamma \leftarrow \text{UFILTR}(\Gamma_1, \Gamma_2).$$

Using the procedure UFILTR, it is possible to construct (completely analogous to standard *merge sort* procedure) the recursive  $\varphi$ -filtering algorithm having computational complexity  $O(N \log N)$ , where  $N$  is the cardinality of the origin set.

In what follows, we will assume that different weights correspond to different paths (both  $c$  and  $\tau$ ). In this case for the set  $\Gamma$  to be  $\varphi$ -filtered, it necessary and sufficient that the inequalities in relations (7) and (8) were strict:

$$c(f|\gamma_1) < c(f|\gamma_2) < \dots < c(f|\gamma_n), \quad (9)$$

$$\tau(f|\gamma_1) > \tau(f|\gamma_2) > \dots > \tau(f|\gamma_n). \quad (10)$$

To estimate the computational complexity of the algorithm, which will be described below, we need some information from the Records theory [16]. Note that if we order the elements of  $\mathcal{M}(s, t)$  in ascending order of their  $c$ -weights, that is, relation (9) will hold, then an element  $\gamma_i$  of  $\mathcal{M}(s, t)$  enters  $\varphi(\mathcal{M}(s, t))$  if  $i = 1$  or  $\tau(f|\gamma_i) < m_i := \min\{\tau(f|\gamma_1), \dots, \tau(f|\gamma_{i-1})\}$  (for  $i = 2, \dots, n$ ), in other words, if the value  $\tau_i := \tau(f|\gamma_i)$  is a *record value* in the sequence  $\tau_1, \dots, \tau_n$ . So, the cardinality of  $\varphi(\mathcal{M}(s, t))$  is equal to the number of Records in this sequence.

We will slightly concern the interesting case when the weights  $c(e), \tau(e), e \in E(G)$  are randomly drawn from a continuous distribution with mutually independent components. Of course, this assumption is unrealistic but it is interesting from a theoretical point of view. In the case of real transport networks weights  $c(\gamma)$  and  $\tau(\gamma)$  are related, as a rule, by some monotonically increasing function; therefore, the cardinality of  $\varphi(\mathcal{M}(s, t))$  is equal to 1. In the other extreme case, when these qualities are related by some monotonically decreasing function,  $\varphi(\mathcal{M}(s, t)) = \mathcal{M}(s, t)$ .

Note that, despite our assumptions, the variables  $\tau_1, \dots, \tau_n$  are generally dependent, since the paths  $\gamma_i$  and  $\gamma_j$  can contain common edges.

Random variables  $X_1, \dots, X_n$  are called *symmetrically dependent* if their joint distribution is invariant under any permutation  $\pi = (\pi(1), \dots, \pi(n))$  of the original indexes.

Denote by  $\Pi = \{\pi\}$  the set of all permutations of elements of the set  $\{1, \dots, n\}$ .

Random variable  $\sigma$  with values in  $\Pi$  is called (uniformly distributed) *random permutation* of elements of the set  $\{1, \dots, n\}$  if  $\mathbf{P}\{\sigma = \pi\} = 1/n!$  for any  $\pi \in \Pi$ . In the sequel we will omit words «uniformly distributed» when speaking about random permutations.

Note, that if  $\sigma$  is a random permutation and  $\pi' \in \Pi$  is a fixed permutation then both permutations  $\sigma\pi'$  and  $\pi'\sigma$  are also random permutations.

**Lemma 1.** Let  $X_1, \dots, X_n$  be arbitrary random variables and  $\sigma$  be a random index permutation independent on  $X_1, \dots, X_n$ . Then the random variables  $X_{\sigma(1)}, \dots, X_{\sigma(n)}$  are symmetrically dependent.

**Proof.** For given Borel sets  $B_1, \dots, B_n$  and fixed  $\pi' \in \Pi$  by the formula of total probability we have

$$\begin{aligned} \mathbf{P}\{X_{\pi'\sigma(1)} \in B_1, \dots, X_{\pi'\sigma(n)} \in B_n\} &= \\ &= \sum_{\pi \in \Pi} \mathbf{P}\{X_{\pi'\sigma(1)} \in B_1, \dots, X_{\pi'\sigma(n)} \in B_n | \sigma = \pi\} \mathbf{P}\{\sigma = \pi\} = \\ &= \frac{1}{n!} \sum_{\pi \in \Pi} \mathbf{P}\{X_{\pi'\pi(1)} \in B_1, \dots, X_{\pi'\pi(n)} \in B_n\}. \end{aligned}$$

If  $\pi$  runs over the set  $\Pi$  then  $\pi'\pi$  also runs over the set  $\Pi$ , therefore, the right-hand side of the last equality does not depend on  $\pi'$ . ■

**Lemma 2.** Let under the conditions of Lemma 1 the variables  $X_1, \dots, X_n$  satisfy the additional condition:

$$\mathbf{P}\{X_i = X_j\} = 0, \quad \text{if } i \neq j; i, j \in \{1, \dots, n\}. \quad (11)$$

Let  $\pi'$  (depending on  $\sigma$ ) be the permutation which sort the sequence  $X_{\sigma(1)}, \dots, X_{\sigma(n)}$ :  $X_{\pi'\sigma(1)} < \dots < X_{\pi'\sigma(n)}$ . Then  $\pi'\sigma$  is a random permutation.

**Proof.** It follows from (11) that  $\pi'$  is well defined with probability 1. So as variables  $X_{\sigma(1)}, \dots, X_{\sigma(n)}$  are symmetrically dependent, the probability of the event  $\{\pi'\sigma = \pi\}$  is the same for any  $\pi \in \Pi$ . The condition (11) implies that the sum of all such probabilities is equal 1. Therefore  $\mathbf{P}\{\pi'\sigma = \pi\} = 1/n!$  for any  $\pi \in \Pi$ . ■

**Lemma 3.** The introduced variables  $\tau_1, \dots, \tau_n$  are symmetrically dependent.

**Proof.** Without loss of generality, we can assume that the sequence of the elements of  $\mathcal{M}(s, t)$  entering at the input of a  $c$ -sorting procedure is formed by a random permutation  $\sigma$  which does not depend on the elements themselves. Since any different paths  $\gamma, \gamma' \in \mathcal{M}(s, t)$  differ from each other at least by two pairs of edges then (11) is satisfied under our assumptions if we substitute  $X_i \equiv c(\gamma|f)$ ,  $X_j \equiv c(\gamma'|f)$ . By Lemma 2 as a result of  $c$ -sorting procedure we obtain indexing  $\pi'\sigma$  of elements of  $\mathcal{M}(s, t)$  which is a realization of a random permutation of the original indexing. Since  $\pi'\sigma$  does not depend on  $\tau$ -weights of

the elements of  $\mathcal{M}(s, t)$ , by Lemma 1 we obtain that the variables  $\tau_{\pi'\sigma(1)}, \dots, \tau_{\pi'\sigma(n)}$  are symmetrically dependent. ■

**Remark.** If graph  $G$  has a special topological structure such that  $c$ -weights (or  $\tau$ -weights) of paths in  $\mathcal{M}(s, t)$  are symmetrically dependent random variables then one can prove that the expected cardinality of the set  $\varphi(\mathcal{M}(s, t))$  is  $O(\log \#\mathcal{M}(s, t))$ . But it is not so in a general case, because  $c$ -sorting permutation of  $\mathcal{M}(s, t)$  has not uniform distribution in general.

#### THE RENPATH ALGORITHM

Let  $f \in F, s = s(f), t = t(f)$ . A path  $\mu \in \mathcal{M}(s, t)$  will be called *rentable*, if  $c(f|\mu) \leq C(f)$  &  $\tau(f|\mu) \leq T(f)$ .

We want to find the set  $\mathcal{M}_{ren}(s, t)$  of all rentable paths for the transportation object  $f$  over given transport network  $G$ .

But a transport network can be very large. The application we are developing is designed to solve the problem of finding cost-effective paths in a transport network with approximately 5 000 vertices and 120 000 edges. Therefore, we narrow our search, first by limiting the lengths of the paths we are looking for to the input parameter  $L_{max}$ , and, second by considering only  $\Phi$ -filtered sets of paths when searching.

In practice, when working with large networks, information about the local network structure is extracted from data base by special applications that appear when describing the algorithm RENPATH as external functions. We will use four such functions: GOAL, NEXT, COST and TIME.

The GOAL function receives data about the transported object  $f$  and returns the start and end vertices of the route. The call to this function is written as  $[s, t] \leftarrow \text{GOAL}(f)$ .

The NEXT function receives vertex  $u$  as input and returns a list of the vertices immediately following  $u$  in the graph  $G$ . The call to this function is written as  $next \leftarrow \text{NEXT}(u)$ .

The COST function receives as inputs a vertex  $u$ , the vertex  $v$  immediately following it, and data about the transported object  $f$ . The function returns the monetary expression of the transport costs associated with moving the object along the route corresponding to the arc  $e = (u, v)$ . The call to this function is written as  $c \leftarrow \text{COST}(u, v, f)$ .

The TIME function is analogous to the COST function, but returns the time costs and the call is written as  $\tau \leftarrow \text{TIME}(u, v, f)$ .

In the description of the algorithm, the notation  $\Gamma(v)$  is used for the set of paths (tracks) from the initial vertex  $s$  to the vertex  $v$ , constructed by the algorithm. The notation  $W(v)$  is used for the corresponding set of weights and the notation  $D(v)$  is used for the corresponding set of sequences of *starting times*. For the path  $\gamma: s \equiv v_{i_0} \rightarrow v_{i_1} \rightarrow \dots \rightarrow v_{i_k} \equiv v$  its weight is defined as the vector  $w(\gamma) = (c(f|\gamma), \tau(f|\gamma), L(\gamma))$  and the sequence of starting times is defined as the vector

$$\begin{aligned} d(v) &= (0, \tau(f|\gamma_0), \tau(f|\gamma_0) + \\ &\quad + \tau(f|\gamma_1), \dots, \sum_{j=0}^{k-1} \tau(f|\gamma_j) \equiv \tau(f|\gamma)), \end{aligned}$$

where  $\gamma_j: v_{i_j} \rightarrow v_{i_{j+1}}, j = 0, 1, \dots, k-1$ . We can write  $W(v) = w(\Gamma(v)), D(v) = d(\Gamma(v))$ . By symbol  $\oplus$  we denote the concatenation operation of paths.

The RENPATH function receives as inputs the bounds of costs  $C(f), T(f)$  and the parameter  $L_{max}$  and returns three lists: *RenPaths, WeightPaths* and *TimePaths*.

Iteration of the main cycle of the algorithm consists in extracting the current vertex (denoted  $u$ ) from the queue and exploring the paths obtained by adding an arc( $u, v$ ), where  $v \in \text{NEXT}(u)$  to the previously found paths to the vertex  $u$ .

When working, the RENPATH function generates an auxiliary list — Queue, and uses standard functions to work with this data structure: ENQUEUE — add an element to the end of the queue; DEQUEUE — extract an element from the beginning of the queue; ISEMPTY — check whether the queue is empty; CHECK — check whether the element is in the queue (or in the path list). Negations of the logical functions CHECK and ISEMPTY are correspondingly denoted by  $\neg\text{CHECK}$  and  $\neg\text{ISEMPTY}$ .

function RENPATH( $f, C(f), T(f), L_{\max}$ )

-----Step 1-----

$RenPaths = \emptyset; WightPaths = \emptyset; TimePaths = \emptyset;$   
 $[s, t] \leftarrow \text{GOAL}(f); Queue \leftarrow s;$   
 $\Gamma(s) \leftarrow \{s\}; W(s) \leftarrow \{(0,0,0)\}; D(s) = \{0\};$

while  $\neg\text{ISEMPTY}(Queue)$  follow steps 2–3

-----Step 2-----

$u \leftarrow \text{DEQUEUE}(Queue); next \leftarrow \text{NEXT}(u);$

-----Step 3-----

for each  $v \in next$

$c \leftarrow \text{COST}(u, v, f); \tau \leftarrow \text{TIME}(u, v);$

$\Gamma_{\text{new}} = \emptyset; W_{\text{new}} = \emptyset; D_{\text{new}} = \emptyset;$

for each  $\gamma \in \Gamma(u)$

$h \leftarrow w(\gamma) + (c, \tau, 1);$

if  $\neg\text{CHECK}(\gamma, v) \ \& \ h \leq (C(f), T(f), L_{\max})$

$\Gamma_{\text{new}} \leftarrow \Gamma_{\text{new}} \cup \{\gamma \oplus (u, v)\};$

$W_{\text{new}} \leftarrow W_{\text{new}} \cup \{h\};$

$D_{\text{new}} \leftarrow D_{\text{new}} \cup \{d(\gamma) \oplus \tau\};$

if  $\Gamma_{\text{new}} \neq \emptyset$

$\Gamma(v) \leftarrow \text{UFILTR}(\Gamma(v), \Gamma_{\text{new}});$

$W(v) \leftarrow w(\Gamma(v)); D(v) \leftarrow d(\Gamma(v));$

if  $\neg\text{CHECK}(Queue, v)$

$Queue \leftarrow \text{ENQUEUE}(Queue, v);$

-----  
 $RenPaths \leftarrow \Gamma(T);$

$WightPaths \leftarrow W(T);$

$TimePaths \leftarrow D(T);$

return  $RenPaths, WightPaths, TimePaths$

**Remark.** Of course, there is no need to repeatedly use calls of such time-consuming functions as COST and TIME when processing the same edges or the NEXT function when processing the same vertex. In the practical implementation of the algorithm, they are called once for each edge and each vertex. The information obtained is stored in the subnet  $G_f = \langle V_f, E_f, c_f, \tau_f \rangle$  that is being constructed during the algorithm.

Let  $\mathcal{M}_{ren}(s, t) \subset \mathcal{M}(s, t)$  be the set of rentable paths whose lengths do not exceed  $L_{\max}$ ,  $\mathcal{M}^* = \Phi(\mathcal{M}_{ren}(s, t))$ .

**Theorem 1.** If the external functions work correctly then  $RenPaths = \mathcal{M}^*$ .

**Proof.** It is obvious that the number of vertices explored by the RENPATH algorithm is finite and that every vertex from them gets into the queue a finite number of times. Therefore, the RENPATH algorithm will stop. It is obvious also the inclusion  $RenPaths \subset \mathcal{M}^*$ . So, we must prove the inverse inclusion.

Assume the opposite. Let  $\mu: s \rightarrow v_{i_1} \rightarrow \dots \rightarrow v_{i_{k-1}} \rightarrow t$  be a path such that  $\mu \in \mathcal{M}^*$ ,  $\mu \notin RenPaths$ . In this case  $\exists j \in \{2, \dots, k-1\}$  such that  $\gamma: s \rightarrow v_{i_1} \rightarrow \dots \rightarrow v_{i_j} \notin \Gamma(v_{i_j})$ , but  $s \rightarrow v_{i_1} \rightarrow \dots \rightarrow v_{i_{j-1}} \in \Gamma(v_{i_{j-1}})$ . So, as we assume that the external functions work correctly,  $\exists \gamma' \in \Gamma(v_{i_j})$  which is  $\preceq_f$ -better than  $\gamma$ . Consequently, the path  $\mu': \gamma' \rightarrow v_{i_{j+1}} \rightarrow t$  is  $\preceq_f$ -better than  $\mu$  what contradicts the condition  $\mu \in \mathcal{M}^*$ . ■

Now we will consider the case when weights  $c$  and  $\tau$  are nonnegative and the set  $\mathcal{M}(s, t)$  is the set of all simple paths from  $s$  to  $t$  in  $G$ . Let introduce the following denotations:

$$c_{\max} = \max\{c(e) | e \in E(G)\}, c_{\min} = \min\{c(e) | e \in E(G)\},$$

$$\tau_{\max} = \max\{\tau(e) | e \in E(G)\}, \tau_{\min} = \min\{\tau(e) | e \in E(G)\},$$

$$R = \frac{c_{\max}}{c_{\min}} \times \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\min}}.$$

**Theorem 2.** Let  $\#V(G) = n$ ,  $T(n)$  and  $S(n)$  be the time and the memory using by RenPath algorithm to construct the set  $\varphi(\mathcal{M}(s, t))$ . Then

$$1) T(n) = O(Rn^3 \log(Rn));$$

$$2) S(n) = O(Rn^3).$$

**Proof.** 1) Let  $\mathcal{M}_k(v)$  be the set of simple paths from  $s$  to  $v$  of the length  $k \in \{1, \dots, n-1\}$ ,  $\mathcal{M}(v) = \cup \mathcal{M}_k(v)$ . Processing during BFS-algorithm includes three steps — dequeuing the vertex from the queue, filtering the paths to adjective vertices and entering the queue some of those vertices. Every vertex can be entering and dequeuing no more than  $(n-1)$  times. So, for every vertex  $v \in V(G)$  the corresponding set  $P(v)$  of weights of paths from  $s$  to  $v$  is being corrected by filtering procedure  $O(n)$  times. The  $c$ -weights of paths during the RenPath-algorithm are not exceed  $(n-1) \times c_{\max}$  and  $\tau$ -weights of paths are not exceed  $(n-1) \times \tau_{\max}$ . So, all weights of paths may be presented as points in the rectangle

$$[0, (n-1) \times c_{\max}] \times [0, (n-1) \times \tau_{\max}].$$

There are no more than four of such points in a rectangle of the form  $[x, x + c_{\min}] \times [y, y + \tau_{\min}]$ . Therefore, the size of a set of paths entering the filtering procedure on every step is

$$O\left(\frac{(n-1) \times c_{\max} \times (n-1) \times \tau_{\max}}{c_{\min} \times \tau_{\min}}\right) = O(n^2 R).$$

So, the time of filtering weights of the paths under consideration is  $O(n^2 R \log(nR))$  on every step. As a result, we have statement 1). From the above it follows that  $S(n) = n \times O(n^2 R) = O(Rn^3)$ , that is, we have statement 2) also. ■

#### REFERENCES

1. Dijkstra E. W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, *Numerische Mathematik*, 1959, Vol. 1, Is. 1, Pp. 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390.
2. Moore, E. F. The Shortest Path Through a Maze, *Proceedings of an International Symposium on the Theory of*

Switching, Cambridge, MA, USA, April 02–05, 1957. Part II. Cambridge (MA), Harvard University Press, 1959, Pp. 285–292.

3. Bellman R. On a Routing Problem, *Quarterly of Applied Mathematics*, 1958, Vol. 16, No. 1, Pp. 87–90.

DOI: 10.1090/QAM/102435.

4. Zhan F. B. Three Fastest Shortest Path Algorithms on Real Road Networks: Data Structures and Procedures, *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1997, Vol. 1, No. 1. Pp. 69–82.

5. Pankratiev E. V., Chepovskii A. M., Cherepanov E. A., Chernyshev S. V. Algoritmy i metody resheniya zadach sostavleniya raspisaniy i drugikh ekstremalnykh zadach na grafakh bolshikh razmernostey [Algorithms and Methods for Solving Scheduling Problems and Other Extremum Problems on Large-Scale Graphs], *Fundamentalnaya i prikladnaya matematika [Fundamental and Applied Mathematics]*, 2003, Vol. 9, No. 1, Pp. 235–251. (In Russian)

6. Baushev A. N., Semenova O. L., Utepbergenov I. T., Akhmediyarova A. T. O zadache poiska optimalnykh marshrutov [On the Problem of Searching the Optimal Routes], *Sbornik materialov XXI Mezhdunarodnoy konferentsii po myagkim vychisleniyam i izmereniyam [Proceedings of the XXI International Conference on Soft Computing and Measurement] (SCM`2018), Saint Petersburg, May 23–25, 2018. Volume 1.* Saint Petersburg, Saint Petersburg Electrotechnical University, 2018, Pp. 361–363. (In Russian)

7. Kellerer H., Pferschy U., Pisinger D. Knapsack Problems: Monograph. Heidelberg, Springer-Verlag, 2004, 568 p. DOI: 10.1007/978-3-540-24777-7.

8. Campigotto P., Passerini A., Battiti R. Active Learning of Pareto Fronts, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2014, Vol. 25, Is. 3, Pp. 506–519.

DOI: 10.1109/TNNLS.2013.2275918.

9. Couckuyt I., Deschrijver D., Dhaene T. Fast Calculation of Multiobjective Probability of Improvement and Expected Improvement Criteria for Pareto Optimization, *Journal of Global Optimization*, 2014, Vol. 60, Is. 3, Pp. 575–594.

DOI: 10.1007/s10898-013-0118-2.

10. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, Vol. 6, Is. 2, Pp. 182–197. DOI: 10.1109/4235.996017.

11. Zuluaga M., Krause A., Püschel M.  $\epsilon$ -PAL: An Active Learning Approach to the Multi-Objective Optimization Problem, *Journal of Machine Learning Research*, 2016, Vol. 17, Art. No. 15-047, 32 p.

12. Messac A., Ismail-Yahaya A., Mattson C. A. The Normalized Normal Constraint Method for Generating the Pareto Frontier, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2003, Vol. 25, Is. 2, Pp. 86–98.

DOI: 10.1007/s00158-002-0276-1.

13. Andersson J. A Survey of Multiobjective Optimization in Engineering Design. Technical report LiTH-IKP-R-1097. Department of Mechanical Engineering Linköping University, Linköping, Sweden, 2000, 34 p.

14. Preparata F. P., Shamos M. I. Computational Geometry: An Introduction. New York, Springer New York, 1985, 390 p.

15. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. Introduction to Algorithms. Third Edition. Cambridge (MA), MIT Press, 2009, 1292 p.

16. Arnold B. C., Balakrishnan N., Nagaraja H. N. Records. New York, John Wiley & Sons, 1998.

DOI: 10.1002/9781118150412.

# Алгоритм многокритериальной оптимальной маршрутизации

к.ф.-м.н. А. Н. Баушев

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

к.ф.-м.н. О. Л. Семёнова

Санкт-Петербургский государственный университет  
Санкт-Петербург, Россия  
o\_semenova@mail.ru

**Аннотация.** Статья посвящена описанию метода построения множества допустимых маршрутов в транспортной сети в ситуации, когда заданы ограничения на длины и веса рассматриваемых маршрутов. Обосновывается корректность и оценивается сложность предложенного алгоритма. Анализируется случай, когда веса ребер в рассматриваемом графе можно рассматривать как результат процедуры независимого случайного выбора из непрерывного распределения с независимыми компонентами.

**Ключевые слова:** транспортные сети, оптимальная маршрутизация, множество Парето, рекорды в последовательности случайных величин, случайные перестановки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Dijkstra, E. W. A Note on Two problems in Connexion with Graphs // *Numerische Mathematik*. 1959. Vol. 1, Is. 1. Pp. 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390.
2. Moore, E. F. The Shortest Path Through a Maze // *Proceedings of an International Symposium on the Theory of Switching* (Cambridge, MA, USA, 02–05 April 1957). Part II. — Cambridge (MA): Harvard University Press, 1959. — Pp. 285–292. — (The Annals of the Computation Laboratory of Harvard University; Vol. XXX).
3. Bellman, R. On a Routing Problem // *Quarterly of Applied Mathematics*. 1958. Vol. 16, No. 1. Pp. 87–90. DOI: 10.1090/QAM/102435.
4. Zhan, F. B. Three Fastest Shortest Path Algorithms on Real Road Networks: Data Structures and Procedures // *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*. 1997. Vol. 1, No. 1. Pp. 69–82.
5. Алгоритмы и методы решения задач составления расписаний и других экстремальных задач на графах больших размерностей / Е. В. Панкратьев, А. М. Чеповский, Е. А. Черепанов, С. В. Чернышёв // *Фундаментальная и прикладная математика*. 2003. Т. 9, № 1. С. 235–251.
6. О задаче поиска оптимальных маршрутов / А. Н. Баушев, О. Л. Семёнова, И. Т. Утепбергенов, А. Т. Ахмедиярова // *Сборник материалов XXI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2018)* (Санкт-Петербург, Россия, 23–25 мая 2018 г.): в 2 т. — Санкт-Петербург: ЛЭТИ, 2018. — Т. 1. — С. 361–363.

7. Kellerer, H. Knapsack Problems: Monograph / H. Kellerer, U. Pferschy, D. Pisinger. — Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. — 568 p. DOI: 10.1007/978-3-540-24777-7.

8. Campigotto, P. Active Learning of Pareto Fronts / P. Campigotto, A. Passerini, R. Battiti // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2014. Vol. 25, Is. 3. Pp. 506–519. DOI: 10.1109/TNNLS.2013.2275918.

9. Couckuyt, I. Fast Calculation of Multiobjective Probability of Improvement and Expected Improvement Criteria for Pareto Optimization / I. Couckuyt, D. Deschrijver, T. Dhaene // *Journal of Global Optimization*. 2014. Vol. 60, Is. 3. Pp. 575–594. DOI: 10.1007/s10898-013-0118-2.

10. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II / K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002. Vol. 6, Is. 2. Pp. 182–197. DOI: 10.1109/4235.996017.

11. Zuluaga, M.  $\epsilon$ -PAL: An Active Learning Approach to the Multi-Objective Optimization Problem / M. Zuluaga, A. Krause, M. Püschel // *Journal of Machine Learning Research*. 2016. Vol. 17. Art. No. 15-047. 32 p.

12. Messac, A. The Normalized Normal Constraint Method for Generating the Pareto Frontier / A. Messac, A. Ismail-Yahaya, C. A. Mattson // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2003. Vol. 25, Is. 2. Pp. 86–98. DOI: 10.1007/s00158-002-0276-1.

13. Andersson, J. A Survey of Multiobjective Optimization in Engineering Design. Technical report LiTH-IKP-R-1097. Department of Mechanical Engineering Linköping University, Linköping, Sweden. 2000. 34 p.

14. Preparata, F. P. Computational Geometry: An Introduction / F. P. Preparata, M. I. Shamos. — New York: Springer New York, 1985. — 390 p. — (Texts and Monographs in Computer Science).

15. Introduction to Algorithms. Third Edition / T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein. — Cambridge (MA): MIT Press, 2009. — 1292 p.

16. Arnold, B. C. Records / B. C. Arnold, N. Balakrishnan, H. N. Nagaraja. — New York: John Wiley & Sons, 1998. — (Wiley Series in Probability and Statistics). DOI: 10.1002/9781118150412.

# Оптимизация скорости для снижения времени транспортировки и расхода топлива автобетоносмесителей

О. А. Дурницын

Тюменский индустриальный университет

Тюмень, Россия

durnitsynoa@mail.ru

**Аннотация.** В настоящее время применение автобетоносмесителей представляет неотъемлемое условие проведения работ по перевозке бетона. При этом актуальным является вопрос о минимизации затрат на выполнение работ и оптимизации с известным циклом скорости движения для экономии топлива, учитывая, что время транспортировки, как и расход топлива, влияет на транспортные расходы. Скорость транспортного средства принимается в качестве переменного состояния. Результаты моделирования показывают, что коэффициенты времени транспортировки и экономии топлива могут быть оптимально распределены для различных требований. Предлагаемая система может повысить экономию топлива на 26,59 % при гарантии того же времени транспортировки, или время транспортировки может быть сокращено на 42,4 % без ущерба для расхода топлива. Оптимизация скорости может значительно снизить транспортные расходы.

**Ключевые слова:** автобетоносмеситель, цикл скорости, топливная экономичность, оптимизация затрат.

## ВВЕДЕНИЕ

Специальные грузовые автомобили — автобетоносмесители — имеют широкое применение. Автобетоносмесители перемещаются туда и обратно между пунктом погрузки и пунктом разгрузки по относительно фиксированному маршруту. Некоторые предприятия сталкиваются с проблемой, заключающейся в том, что транспортные расходы превышают потенциальную прибыль. Поэтому очень важно повысить экономию топлива специальных автомобилей для снижения транспортных расходов. Поскольку автобетоносмесители часто работают на низкой скорости и в условиях продолжительной нагрузки двигателей внутреннего сгорания (ДВС), оптимизация расхода топлива обычно идет вразрез со временем транспортировки. Поэтому представляется важным разработать цикл оптимальной скорости, который может повысить эффективность транспортировки и сократить время [1–3].

Оптимальная траектория скорости снижает расход топлива на 10 % при незначительном снижении времени в пути [4]. Оптимизация между силовым агрегатом и его трансмиссией может повысить топливную экономичность с использованием реальных данных о движении. Результаты моделирования цикла движения показывают, что экономия топлива можно значительно повысить, пожертвовав временем прибытия. По сравнению с известными циклами движения предлагаемая система может значительно повысить экономию топлива при гарантии того же времени транспортировки [5].

В соответствии с рабочими характеристиками автобетоносмесителей цикл скорости движения устанавливается в соответствии с эксплуатационными данными. Рабочие характеристики автобетоносмесителей можно описать следующим образом: ожидание погрузки, движение по дороге с полной загрузкой, разгрузка на ровной дороге и движение по дороге без нагрузки. Время цикла составляет 2 160 с, пробег — 15 км, максимальная скорость движения — 60 км/ч. В данном исследовании целью оптимизации является максимальная экономия топлива автобетоносмесителей.

Перед решением целевой функции должны быть выполнены ограничения на систему. Ограничения производительности заключаются в ограничении мощности ДВС и колебаний скорости. Предполагая, что скорость транспортного средства на определенном временном шаге  $k$  равна  $V_k$ , формула может быть выражена как

$$V_{k+1}^2 - V_k^2 = 2 \times a_k \times \Delta S,$$

где  $V_k$  — скорость транспортного средства,  $a_k$  — ускорение,  $\Delta S$  — расстояние в пути.

Основанный на известном скоростном цикле расход топлива учитывает только область времени. Заданный цикл скорости разделяется в соответствии с определенным временным шагом. Однако управляющие переменные задаются как время транспортировки и расход топлива, а скорость транспортного средства в предлагаемой системе задается в качестве переменного состояния [6, 7].

Время транспортировки и расход топлива от всех точек состояния предыдущей конечной точки до точек состояния текущей конечной точки рассчитываются для получения всех возможных условий всего цикла.

Предполагая, что известная длина равна  $S$ , общее расстояние делится, например, на три сегмента, что выражается как

$$S = \{S_0, S_1, S_2, S_3\}.$$

Время транспортировки и расход топлива  $Je(1, V_k)$ ,  $k = 1, 2, 3$  на отрезке  $\{S_0-S_1\}$  может быть вычислено по точке начального состояния  $S_0(V_0)$  и точкам  $S_1(V_k)$ ,  $k = 1, 2, 3$ . На втором отрезке  $\{S_1-S_2\}$ , взяв, например, точку состояния  $S_2(V_1)$  и вычисленную на предыдущем этапе точку  $S_1(V_1)$ , мы сможем получить минимальное решение  $Je(2, V_1)$ . Аналогично получены оптимальные результаты  $Je(2, V_k)$ ,  $k = 1, 2, 3$ . Наконец, получается оптимальная комбинация управляющих переменных, которая минимизирует расходы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Общее расстояние разделено на 825 точек сетки интервалом в 10. Скорость транспортного средства разделена 60 точками сетки от 0 до 60 км/ч. Изменение длины маршрута принимается в качестве переменной этапа, а соотношения коэффициентов задаются как  $\alpha/\gamma = 1,2, 1,205, 1,22, 1,3, 1,6, 1,9, 2,2, 2,5$ ;  $\gamma = 1$  соответственно.

Время транспортировки и расход топлива для автобетоносмесителя моделируются в рамках заданного цикла фиксированного маршрута, результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

Влияние различных коэффициентов на эффективность транспортировки и расход топлива

Коэффициент $\alpha$	Расход топлива, кг	Время транспортировки, с
$\alpha = 1,200$	3,4991	2 259,2
$\alpha = 1,205$	3,6571	2 162,2
$\alpha = 1,220$	3,9232	1 968,0
$\alpha = 1,300$	4,3993	1 603,5
$\alpha = 1,600$	4,7213	1 393,5
$\alpha = 1,900$	4,9026	1 281,4
$\alpha = 2,200$	4,9877	1 244,1
$\alpha = 2,500$	5,0194	1 235,2

Оптимальная транспортная эффективность и расход топлива при различных коэффициентах показаны на рисунке 1.

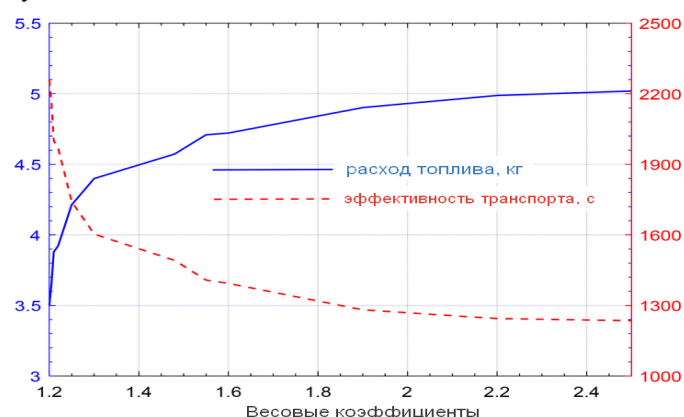
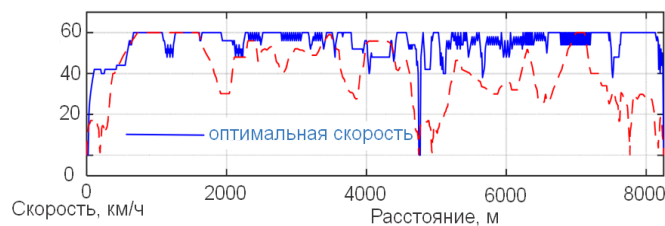
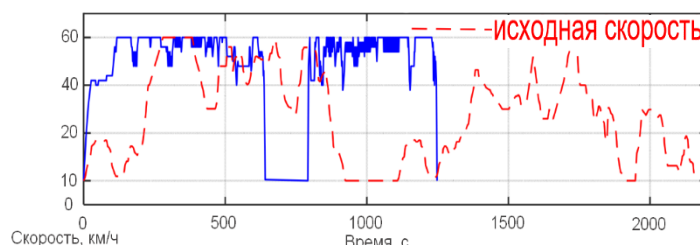


Рис. 1. Результаты моделирования, соответствующие различным коэффициентам

Можно обнаружить, что увеличение коэффициента приводит к повышению эффективности транспортировки, но более высокому расходу топлива, они противоречат друг другу. Однако весовые коэффициенты оказывают важное влияние на оптимальные результаты, особенно от 1,2 до 1,8. По сравнению с расходом топлива в известном цикле скорости движения, временной весовой коэффициент составляет 1,205, а расход топлива составляет 3,6571 кг, когда время транспортировки также составляет 2 160 с. Экономия топлива может быть увеличена на 26,59 %. В противном случае время транспортировки составляет 1244,1 с, коэффициент времени равен 2,2, когда расход топлива равен расходу топлива в цикле с известной скоростью движения [8]. Эффективность транспортировки может быть повышена на 42,4 % при том же расходе топлива. Оптимальная скорость показана на рисунке 2.



a



b

Рис. 2. Изменение скорости транспортного средства при  $\alpha/\gamma = 2,2$

a — в зависимости от расстояния маршрута;  
b — в зависимости от времени

Следовательно, транспортные расходы могут быть снижены при выборе оптимизации скорости, как показано в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение результатов оптимизации для двух стратегий управления энергопотреблением

Стратегии	Расход топлива, кг	Время транспортировки, с	Экономия топлива, %	Эффективность, %
Исходная	4,9813	2 160,0	-	-
$\alpha = 1,205$	3,6570	2 162,2	26,59	-
$\alpha = 2,200$	4,9877	1 244,1	-	42,4

На рисунке 2 показано, что скорость меняется в зависимости от расстояния при заданном цикле движения, когда коэффициент  $\alpha/\gamma$  дополнительно увеличивается до 2,2. Результаты моделирования показывают, что автобетоносмеситель может двигаться с максимально возможной скоростью, время движения с полной загрузкой составляет до 640,5 с. По сравнению с первоначальным скоростным циклом оптимальный расход топлива составляет 4,9877 кг, поэтому оптимизация скорости позволяет сократить время транспортировки на 42,4 % при том же расходе топлива [9, 10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена оптимизация скорости для специального грузового автомобиля — автобетоносмесителя. Для достижения оптимального скоростного цикла при различных коэффициентах рассчитываются расход топлива и время транспортировки. При коэффициенте равном 1,205 экономия топлива может быть увеличена на 26,59 % при

том же времени транспортировки. Если коэффициент выбран равным 2,2, эффективность транспортировки может быть повышена на 42,4 % при той же экономии топлива. В настоящей статье рассчитаны оптимальные решения для снижения транспортных расходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маняшин, А. В. Прогнозирование и планирование ресурсов на автомобильном транспорте с использованием информационных технологий. — Тюмень: Тюменский гос. нефтегазовый ун-т, 2015. — 145 с.

2. Маняшин, С. А. Автоматизация исследований режимов движения автомобилей в городе / С. А. Маняшин, А. В. Маняшин // Проблемы эксплуатации систем транспорта: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 45-летию со дня основания Тюменского индустриального института им. Ленинского комсомола (Тюмень, Россия, 06 ноября 2008 г.) / отв. ред. В. И. Бауэр. — Тюмень: Тюменский гос. нефтегазовый ун-т, 2008. — С. 197–198.

3. Кувыкин, В. И. Анализ оптимальных решений в задачах нелинейного программирования / В. И. Кувыкин, Е. В. Кувыкина, М. Ю. Петухов // Вестник Нижегородского университета имени Н. И. Лобачевского. 2011. № 4 (5). С. 2285–2286.

4. Маняшин, С. А. Методика исследования режимов движения автомобилей в городских условиях / С. А. Маняшин, А. В. Маняшин // Проблемы эксплуатации и обслуживания транспортно-технологических машин: Материалы Международной научно-технической конференции (Тюмень, Россия, 14 апреля 2008 г.) / отв. ред. Н. С. Захаров. — Тюмень: Тюменский гос. нефтегазовый ун-т, 2008. — С. 126–128.

5. Вычисление низкотемпературных характеристик дизельного топлива с помощью искусственных нейронных сетей / С. Маринович, Т. Болачча, С. Юкич, [и др.] // Химия и технология топлив и масел. 2012. № 1 (569). С. 47–51.

6. Яницкий, Л. Н. Интеллектуальные системы: Учебник. — Москва: Лаборатория знаний, 2016. — 221 с. — (Учебник для высшей школы).

7. A Dual Strategy for Controlling Energy Consumption and Air Pollution in China's Metropolis of Beijing / Y. Zhang, H. Wang, S. Liang, [et al.] // Energy. 2015. Vol. 81. Pp. 294–303. DOI: 10.1016/j.energy.2014.12.041.

8. CO2 Emissions from Fuel Combustion 2016. — Paris: International Energy Agency, 2016. — 533 p. DOI: 10.1787/co2\_fuel-2016-en.

9. Wang, J. Fuel Consumption Model for Conventional Diesel Buses / J. Wang, H. A. Rakha // Applied Energy. 2016. Vol. 170. Pp. 394–402. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.124.

10. Typaldos, P. Minimization of Fuel Consumption for Vehicle Trajectories / P. Typaldos, I. Papamichail, M. Papageorgiou // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2020. Vol. 21, Is. 4. Pp. 1716–1727. DOI: 10.1109/TITS.2020.2972770.



# Speed Optimization to Reduce Transportation Time and Fuel Consumption of Concrete Mixers Truck

O. A. Durnitsyn

Industrial University of Tyumen  
Tyumen, Russia  
durnitsynoa@mail.ru

**Abstract.** Currently, the use of truck mixers is an essential condition for carrying out work on the transportation of concrete. At the same time, the issue of minimizing the cost of performing work and optimizing with a known cycle of speed to save fuel is relevant, given that the time of transportation, as well as fuel consumption, affects transportation costs. The vehicle speed is taken as a state variable. The simulation results show that the transport time and fuel economy ratios can be optimally distributed for different requirements. The proposed system can improve fuel economy by 26,59 % while guaranteeing the same travel time, or travel time can be reduced by 42,4 % without sacrificing fuel consumption. Speed optimization can greatly reduce transportation cost.

**Keywords:** concrete mixer truck, speed cycle, fuel efficiency, cost optimization.

## REFERENCES

1. Manyashin A. V. Forecasting and planning resources in road transport using information technology [Prognozirovanie i planirovanie resursov na avtomobilnom transporte s ispolzovaniem informatsionnykh tekhnologiy]. Tyumen, Tyumen State Oil and Gas University, 2015, 145 p.
2. Manyashin S. A., Manyashin A. V. Automation of Researches of Modes of Movement of Cars in the City [Avtomatizatsiya issledovaniy rezhimov dvizheniya avtomobiley v gorode], *Problems of Operation of Transport Systems: Collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference [Problemy ekspluatatsii sistem transporta: Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii]*, Tyumen, Russia, November 06, 2008. Tyumen, Tyumen State Oil and Gas University, 2008, Pp. 197–198.
3. Kuvykin V. I., Kuvykina E. V., Petukhov M. Yu. The Analysis of Optimal Solutions in Non Linear Programming Problems [Analiz optimalnykh resheniy v zadachakh nelineynogo programmirovaniya], *Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod [Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N. I. Lobachevskogo]*, 2011, No. 4 (5), Pp. 2285–2286.
4. Manyashin S. A., Manyashin A. V. Methodology for Research of Modes of Movement of Cars in Urban Conditions [Metodika issledovaniya rezhimov dvizheniya avtomobiley v gorodskikh usloviyakh], *Problems of Operation and Maintenance of Transport and Technological Machines: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference [Problemy ekspluatatsii i obsluzhivaniya transportno-tekhnologicheskikh mashin: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii]*, Tyumen, Russia, April 14, 2008. Tyumen, Tyumen State Oil and Gas University, 2008, Pp. 126–128.
5. Marinovich S., Bolanca T., Ukich S., et al. Calculation of Low-Temperature Properties of Diesel Fuel Using Artificial Neural Networks [Vychislenie nizkotemperaturnykh kharakteristik dizelnogo topliva s pomoshchyu iskusstvennykh neyronnykh setey], *Chemistry and Technology of Fuels and Oils [Khimiya i tekhnologiya topliv i masel]*, 2012, No. 1 (569), Pp. 47–51.
6. Yasnitsky L. N. Intelligent Systems: Textbook [Intellektualnye sistemy: Uchebnik]. Moscow, Laboratory of Knowledge, 2016, 221 p.
7. Zhang Y., Wang H., Liang S., et al. A Dual Strategy for Controlling Energy Consumption and Air Pollution in China's Metropolis of Beijing, *Energy*, 2015, Vol. 81, Pp. 294–303. DOI: 10.1016/j.energy.2014.12.041.
8. CO2 Emissions from Fuel Combustion 2016. Paris, International Energy Agency, 2016, 533 p. DOI: 10.1787/co2\_fuel-2016-en.
9. Wang J., Rakha H. A. Fuel Consumption Model for Conventional Diesel Buses, *Applied Energy*, 2016, Vol. 170. Pp. 394–402. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.124.
10. Typaldos P., Papamichail I., Papageorgiou M. Minimization of Fuel Consumption for Vehicle Trajectories, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, Vol. 21, Is. 4, Pp. 1716–1727. DOI: 10.1109/TITS.2020.2972770.

# Применение факторного анализа для снижения размерности исходных данных мониторинга ИТ-инфраструктуры

М. А. Большаков

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

**Аннотация.** Рассматривается применение факторного анализа для снижения размерности исходных данных мониторинга ИТ-инфраструктуры. Приводятся теоретические основы факторного анализа, основная терминология. Показано проведение факторного анализа при помощи пакета IBM SPSS на реальных данных мониторинга с уменьшением их в 6,5 раза. Обоснованы преимущества применения факторного анализа для уменьшения нагрузки на вычислительный комплекс путем сокращения размерности данных.

**Ключевые слова:** факторный анализ, мониторинг, ИТ-инфраструктура, снижение размера данных.

## ВВЕДЕНИЕ

Вопрос оптимизации использования вычислительных ресурсов является актуальным при решении практически любой задачи прогнозирования, особенно повышается его актуальность при работе с большими массивами разнородных данных. Ведь помимо метрик, характеризующих качество той или иной прогнозной модели [1], исследователь всегда должен сравнить используемые методы машинного обучения по длительности их работы, чтобы сделать адекватный выбор с учетом прикладного смысла задачи и необходимой частоты переобучения модели уже в режиме постоянного использования.

Обязательным подходом к снижению нагрузки на вычислительные ресурсы, равно как и к обеспечению корректного результата прогнозирования, является предварительная модификация исходных данных, а именно сокращение как количества анализируемых переменных, так и количества временных срезов, используемых в модели обучения. Работа по данному направлению может быть реализована различными способами, например, можно руководствоваться классическими принципами, изложенными в теории информации Клода Шеннона [2]. Одним из них является принцип максимума взаимной информации Линскера [3], при этом важнейшей функцией системы модификации исходных данных является определение их избыточности и дальнейшая модификация в более сжатый вид [4].

Рассматриваемый принцип максимума информации можно представить, как гипотезу, что преобразование случайного вектора исходных переменных  $M$  в результирующий вектор итоговых значений  $R$  должно выбираться таким образом, чтобы совместная работа элементов выбранного метода машинного обучения максимизи-

ровала информацию об исходных данных. Например, в случае использования нейронных сетей задача формулируется так, чтобы совместная работа нейронов выходного слоя максимизировала информацию о деятельности входного слоя. Функцией, которую необходимо максимизировать в данном случае, будет взаимная информация  $I(M, R)$  между  $M$  и  $R$ . Используя свойство симметричности взаимной информации  $I(M, R) = I(R, M)$  и применяя возможность определения взаимной информации через энтропию, получаем следующее выражение:

$$I(R, M) = H(R) - H(R|M),$$

где  $H(R|M)$  — условная энтропия.

Другими словами, помимо статистической независимости характеристик между собой мы должны обеспечить данную независимость и относительно пары «результат (итоговое состояние) — наблюдение характеристики в заданный момент времени».

В статье рассмотрено применение факторного анализа как способа для сокращения размерности исходных данных без потери их качества для построения моделей машинного обучения.

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МЕТОДА

Фактор — это набор наблюдаемых переменных, которые связаны с результирующей переменной, которая, в свою очередь, не измеряется напрямую. Факторы формируются в соответствии с факторными нагрузками или степенью вариации данных, которую они могут объяснить, следовательно, не все факторы одинаковы, основное их различие для пользователя — в весе каждого из них.

При этом основной принцип направлен на объединение сильно коррелирующих между собой переменных и, как следствие, перераспределение дисперсии между новыми результирующими переменными. После формирования факторов коррелированность переменных внутри каждого фактора между собой будет выше, чем их коррелированность с переменными, попавшими в другой фактор.

Среди основных методов извлечения факторов следует выделить:

1. Анализ главных компонент (Principal component analysis) — это наиболее распространенный метод, в котором максимальная дисперсия помещается в первый фактор, далее происходит удаление этой дисперсии и начинается поиск второго фактора и так далее.

2. Метод главных осей (Principal Axis Factoring) позволяет получить более точное решение. На первом шаге общности вычисляются по методу главных компонент. На каждом последующем шаге собственные значения и факторные нагрузки вычисляются исходя из предыдущих значений общностей, при этом окончательное решение получается при выполнении заданного числа итераций или достижении минимальных различий между общностями на данном и предыдущем шагах.

3. Факторный анализ образов (Image Factoring) — это метод главных компонент, применяемый к так называемой редуцированной корреляционной матрице, у которой вместо единиц на главной диагонали располагаются оценки общностей. Общность каждой переменной оценивается предварительно как квадрат коэффициента множественной корреляции (КМК) этой переменной со всеми остальными.

4. Метод максимального правдоподобия. Этот метод также работает с метрикой корреляции, но использует метод максимального правдоподобия для факторизации.

5. Обобщенный метод наименьших квадратов (Generalized Least Squares) отличается от предыдущего тем, что для каждой переменной вводятся специальные весовые коэффициенты. Чем больше общность переменной, тем в большей степени она влияет на факторную структуру (имеет больший вес). Это соответствует основному принципу статистического оценивания, по которому менее точные наблюдения учитываются в меньшей степени.

6. Другие методы факторного анализа: альфа-факторинг, метод невзвешенных наименьших квадратов.

Собственные значения также называются характеристическими корнями, они показывают дисперсию, объясняемую этим конкретным фактором, из общей дисперсии. Из столбца общности мы можем узнать, какая часть дисперсии объясняется первым фактором из общей дисперсии. Например, если наш первый фактор объясняет 68 % дисперсии от общего числа, это означает, что 32 % дисперсии будут объясняться другим фактором.

Вопрос необходимого качества следует определять согласно критерию Кайзера [5], а именно, если собственные значения больше единицы, то мы должны считать это фактором, или же по правилу дисперсии: если дисперсия меньше 0,7, то мы не должны рассматривать это как фактор.

Для интерпретации результата следует применять метод вращения, при этом собственные значения не влияют на метод вращения, но метод вращения влияет на извлеченные собственные значения или процент дисперсии.

Существует несколько доступных методов вращения:

1. Варимакс (Varimax). Ортогональный метод вращения, минимизирующий число переменных с высокими нагрузками на каждый фактор. Этот метод упрощает интерпретацию факторов.

2. Прямой облимин (Direct oblimin). Метод косоугольного (неортогонального) вращения. Самое косоугольное решение соответствует дельте, равной нулю (по умолчанию). По мере того как дельта отклоняется в отрицательную сторону, факторы становятся более ортогональными. Чтобы изменить задаваемое по умолчанию дельта следует использовать значение меньше или равное 0,8.

3. Квартимакс (Quartimax). Метод вращения, который минимизирует число факторов, необходимых для объяснения каждой переменной. Этот метод существенно упрощает интерпретацию наблюдаемых переменных.

4. Эквимакс (Equimax). Метод вращения, объединяющий методы варимакс, упрощающий факторы, и квартимакс, упрощающий переменные. Минимизируется число переменных с большими факторными нагрузками и число факторов, требуемых для объяснения переменной.

5. Вращение типа промакс (Promax). Косоугольное вращение в предположении, что факторы могут коррелировать между собой. Оно производится быстрее, чем вращение типа прямой облимин, поэтому такой тип полезен для больших наборов данных [6].

#### ПРИМЕР ПРИКЛАДНОЙ ЗАДАЧИ

Мониторинг качества предоставления ИТ-услуг в целом и состояние работоспособности ИТ-инфраструктуры в частности характеризуется большой дискретностью при съеме данных с объектов (с некоторых элементов конфигурации съем происходит каждые 5 секунд), и зачастую метрики для анализа выбираются по принципу «на всякий случай смотреть все, что может отдавать оборудование по SNMP/RMON-протоколу». Таким образом объем обучающей выборки для использования машинного обучения зачастую избыточен по умолчанию, при этом отказаться от сбора данных по всему спектру метрик часто невозможно ввиду объективных причин.

Применим факторный анализ для набора показателей по 420 серверам, включенным в периметр производственной системы ОАО «РЖД» АСУ «Экспресс». В указанном наборе содержится 1 442 измерения по каждому датчику, что в сумме дает 605 640 измерений.

Для проведения факторного анализа воспользуемся программой IBM SPSS, основным достоинством которой является самый широкий охват существующих статистических методов, который удачно сочетается с большим количеством удобных средств визуализации результатов обработки.

После импортирования данных зададим следующие настройки проведения факторного анализа:

- расчет корреляционной матрицы;
- расчет показателя Кайзера-Майера-Олкина (КМО) и критерия сферичности Бартлетта;
- метод отбора — метод главных компонент;
- метод вращения — варимакс;
- выделить факторы на основе собственных значений  $>1$ ;
- вывод графика собственных значений;
- вывод описательной статистики.

По окончании расчета программа SPSS подготавливает подробный отчет, прежде всего выводится таблица «Описательные статистики» (рис. 1).

В этой таблице содержатся средние значения, стандартное отклонение и число измерений для каждой переменной, включенной в факторный анализ.

Далее выводится корреляционная матрица (рис. 2), которая является исходным элементом для дальнейших расчетов.

Описательные статистики

	Среднее	Станд. отклонения <sup>а</sup>	Анализ N <sup>а</sup>
GVCHDSHUSVM213757 SIMSrelevance	1562295427	12492,895	1442
MSKHDSUSPV78967SIM Srelevance	1562295263	12472,004	1442
SVRWHDUSUSPV78650SI MSrelevance	1562295412	12442,530	1442
GVCHDSUSPV78983SIM Srelevance	1562295315	12467,615	1442
GVCHDSVSP97942SIMSrelevance	1562295779	12494,500	1442
MSKHDSVSPG10005828 4SIMSrelevance	1562306307	12493,917	1442
GVCHDSUSPVM25857SI MSrelevance	1562295424	12466,774	1442
SVRWHDUSUSPV78652SI MSrelevance	1562295366	12443,063	1442
ORWHDUSUSPV17229SI MSrelevance	1562296132	12468,241	1442

Рис. 1. Фрагмент таблицы «Описательные статистики»

Корреляция	GVCHDSHUSVM213757 SIMSrelevance	MSKHDSUSPV78967SIMSrelevance	SVRWHDUSUSPV78650SI MSrelevance	GVCHDSUSPV78983SIMSrelevance
GVCHDSHUSVM213757 SIMSrelevance	1,000	,998	,996	,998
MSKHDSUSPV78967SIM Srelevance	,998	1,000	,998	1,000
SVRWHDUSUSPV78650SI MSrelevance	,996	,998	1,000	,998
GVCHDSUSPV78983SIM Srelevance	,998	1,000	,998	1,000
GVCHDSVSP97942SIMSrelevance	1,000	,998	,996	,998
MSKHDSVSPG10005828 4SIMSrelevance	1,000	,998	,996	,998
GVCHDSUSPVM25857SI MSrelevance	,998	1,000	,998	1,000
SVRWHDUSUSPV78652SI MSrelevance	,996	,998	1,000	,998
ORWHDUSUSPV17229SI MSrelevance	,998	1,000	,998	1,000
GVCHDSVSPG10005827 1SIMSrelevance	1,000	,998	,996	,998
SVRWHDUSVSP85165SIM Srelevance	,992	,994	,996	,994

Рис. 2. Фрагмент таблицы «Корреляционная матрица»

Следующим этапом следует вычислить меру выборочной адекватности КМО, используемую для проверки гипотезы о том, что частные корреляции между переменными малы, а также критерий сферичности Бартлетта, который проверяет гипотезу о том, что корреляционная матрица является единичной матрицей [7]. В случае если значение будет менее 0,6, то факторная модель должна быть признана непригодной. В указанном случае значение равно 0,953 (рис. 3), что следует признать хорошим результатом.

КМО и критерий Бартлетта

Мера адекватности выборки Кайзера-Майера-Олкина (КМО).	,953	
Критерий сферичности Бартлетта	Примерная Хи-квадрат	
	ст.св.	44293748
	Значимость	.

Рис. 3. Значения КМО и критерия Бартлетта

После этого следует рассмотреть понятие «Общность», а именно количество дисперсии, которое переменная разделяет со всеми другими рассматриваемыми переменными. SPSS показывает таблицу общностей до и после извлечения — оценка, расположенная в столбце «Начальная», равняется множественному R-квадрат (коэффициенту детерминации) с переменной текущей строки в качестве зависимой и всеми остальными в качестве независимых переменных. Анализ главных компонент основан на первоначальном предположении, что все дисперсии являются общими, следовательно, до извлечения все общности равны 1. Общности в столбце, помеченном как «Извлечение», отражают общую дисперсию в структуре данных (рис. 4).

Другой способ взглянуть на эти общности — с точки зрения доли дисперсии, объясняемой лежащими в основе факторами. После извлечения некоторые факторы отбрасываются и часть информации теряется. Величина дисперсии каждой переменной, которая может быть объяснена оставшимися факторами, представлена общностями после извлечения.

Общности

	Начальная	Извлечение
GVCHDSHUSVM213757 SIMSrelevance	1,000	,997
MSKHDSUSPV78967SIM Srelevance	1,000	,998
SVRWHDUSUSPV78650SI MSrelevance	1,000	,996
GVCHDSUSPV78983SIM Srelevance	1,000	,998
GVCHDSVSP97942SIMSrelevance	1,000	,997
MSKHDSVSPG10005828 4SIMSrelevance	1,000	,997
GVCHDSUSPVM25857SI MSrelevance	1,000	,998
SVRWHDUSUSPV78652SI MSrelevance	1,000	,996
ORWHDUSUSPV17229SI MSrelevance	1,000	,998
GVCHDSVSPG10005827 1SIMSrelevance	1,000	,997
SVRWHDUSVSP85165SIM Srelevance	1,000	,995
GVCHDSHUSVM213749 SIMSrelevance	1,000	,995

Рис. 4. Фрагмент таблицы «Общности»

В таблице «Объясненная совокупная дисперсия» (рис. 5) перечисляются собственные значения, связанные с каждым линейным компонентом (фактором) до извлечения, после извлечения и после вращения. Собственные значения, связанные с каждым фактором, представляют собой дисперсию, объясняемую этим конкретным линейным компонентом, и SPSS также отображает собственное значение в терминах процента объясненной дисперсии (таким образом, фактор 1 объясняет 29,549 % общей дисперсии). Очевидно, что первые несколько факторов объясняют относительно большое количество дисперсии (особенно фактор 1), тогда как последующие факторы объясняют лишь небольшое количество дисперсии. Затем SPSS извлекает все факторы с собственными значениями больше 1, что составляет нам 65 факторов. Собственные значения, связанные с этими

факторами, снова отображаются (с пояснением процента дисперсии) в столбцах, озаглавленных «Извлечение суммы квадратов нагрузок». Значения в этой части таблицы такие же, как и значения до извлечения, за исключением того, что значения отброшенных факторов игнорируются (следовательно, таблица остается пустой после четвертого факто-

ра). В заключительной части таблицы (с пометкой «Ротация суммы квадратов нагрузок») отображаются собственные значения факторов после вращения. Вращение приводит к оптимизации структуры факторов, и одним из следствий этого является то, что относительная важность факторов уравнивается [8].

**Объясненная совокупная дисперсия**

Компонент	Начальные собственные значения			Извлечение суммы квадратов нагрузок			Ротация суммы квадратов нагрузок		
	Всего	% дисперсии	Суммарный %	Всего	% дисперсии	Суммарный %	Всего	% дисперсии	Суммарный %
1	124,107	29,549	29,549	124,107	29,549	29,549	121,307	28,883	28,883
2	34,654	8,251	37,800	34,654	8,251	37,800	28,872	6,874	35,757
3	20,593	4,903	42,703	20,593	4,903	42,703	19,419	4,624	40,381
4	13,269	3,159	45,863	13,269	3,159	45,863	13,486	3,211	43,592
5	13,053	3,108	48,970	13,053	3,108	48,970	13,414	3,194	46,785
6	9,696	2,309	51,279	9,696	2,309	51,279	9,952	2,370	49,155
7	9,020	2,148	53,427	9,020	2,148	53,427	6,246	1,487	50,642
8	8,258	1,966	55,393	8,258	1,966	55,393	5,852	1,393	52,035
9	7,364	1,753	57,146	7,364	1,753	57,146	5,434	1,294	53,329
10	6,140	1,462	58,608	6,140	1,462	58,608	5,428	1,292	54,622
11	5,763	1,372	59,980	5,763	1,372	59,980	4,393	1,046	55,667
12	5,534	1,318	61,298	5,534	1,318	61,298	4,205	1,001	56,669
13	5,240	1,248	62,546	5,240	1,248	62,546	3,730	,888	57,557
14	4,793	1,141	63,687	4,793	1,141	63,687	3,702	,881	58,438
15	4,427	1,054	64,741	4,427	1,054	64,741	3,637	,866	59,304
16	3,850	,917	65,658	3,850	,917	65,658	3,618	,861	60,166
17	3,728	,888	66,545	3,728	,888	66,545	3,406	,811	60,977
18	3,616	,861	67,406	3,616	,861	67,406	3,349	,797	61,774
19	3,458	,823	68,230	3,458	,823	68,230	3,012	,717	62,491
20	3,360	,800	69,030	3,360	,800	69,030	2,997	,714	63,205
21	3,271	,779	69,808	3,271	,779	69,808	2,964	,706	63,910
22	3,059	,728	70,537	3,059	,728	70,537	2,954	,703	64,614
23	2,962	,705	71,242	2,962	,705	71,242	2,862	,681	65,295
24	2,817	,671	71,913	2,817	,671	71,913	2,841	,676	65,972
25	2,743	,653	72,566	2,743	,653	72,566	2,784	,663	66,634

Рис. 5. Фрагмент таблицы «Объясненная совокупная дисперсия»

График собственных значений (рис. 6) изображает компоненты как ось X, а соответствующие собственные значения как ось Y и применяется для критерия отсеивания

Р. Кеттелла. Количество факторов определяется приблизительно по точке перегиба на графике собственных значений до его выхода на пологую прямую после резкого спада.

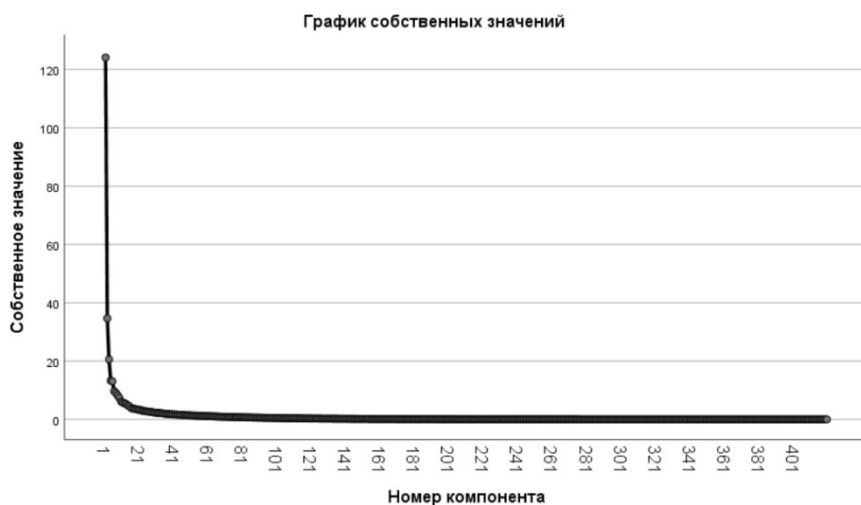


Рис. 6. График собственных значений

На рисунке 7 показана матрица, содержащая нагрузки каждой переменной на каждый фактор. По умолчанию SPSS отображает все нагрузки, однако при настройке

программы было указано, чтобы все нагрузки менее 0,1 были подавлены в выходных данных, поэтому для многих загрузок есть пробелы.

	1	2	3	4	5	6	7	Компонент		
	8	9	10							
ORWHDSUSPV29307SI MSrelevance	,975	-,129	,154							
SVRWHSUSPV28147SI MSrelevance	,975	-,129	,154							
GVCHDSUSPVM25857SI MSrelevance	,975	-,129	,154							
ORWHDSUSPV17476SI MSrelevance	,975	-,129	,154							
ORWHDSUSPV17229SI MSrelevance	,975	-,129	,154							
SVRWHSUSVSPG100059 138SIMSrelevance	,975	-,129	,154							
MSKHDSUSPV78967SIM Srelevance	,975	-,129	,154							
GVCHDSUSPV78983SIM Srelevance	,975	-,129	,154							
SVRWHSUSPV75371SI MSrelevance	,975	-,132	,153							
SVRWHSUSPV78650SI MSrelevance	,975	-,131	,153							
SVRWHSUSPV78652SI MSrelevance	,975	-,132	,153							
GVCHDSVSP97942SIMS relevance	,974	-,128	,155							
ORWHDSVSP85265SIMS relevance	,974	-,128	,155							

Рис. 7. Фрагмент матрицы коэффициентов значений компонентов

В результате проведения факторного анализа из 420 наблюдаемых переменных было выделено 65 факторов, которые объясняют 88 % дисперсии.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе анализа фрагмента исходных данных по мониторингу ИТ-инфраструктуры ОАО «РЖД» на примере одной из производственных систем наглядно показана возможность применения факторного анализа как дополнительного средства для снижения размерности обучающих выборок для использования машинного обучения. Прикладной смысл этой операции направлен на снижение требований к вычислительному комплексу, занятому в переобучении модели прогнозирования (в том числе через упрощение данной модели) будущих состояний объектов мониторинга, и позволяет как сократить требования к оборудованию данного комплекса, так и сократить время на переобучение моделей прогнозирования.

В указанном примере число переменных для анализа было сокращено приблизительно в 6,5 раза (с 420 до 65), при этом выделенные факторы объясняют 88 % дисперсии, что является достаточным показателем для дальнейшего анализа выборки и поиска закономерностей. Объем применения факторного анализа, безусловно, может быть расширен для всех метрик, снимаемых с объектов мониторинга и удовлетворяющих требованиям к возможности применения факторного анализа.

Таким образом, исследование может быть продолжено, но даже сейчас следует подтвердить, что применение факторного анализа на этапе подготовки данных для использования в машинном обучении является хорошим способом сокращения нагрузки на вычислительный комплекс без

потери качества исходных данных, а следовательно, без снижения результата.

Развивая эту мысль, можно говорить о том, что данный промежуточный шаг обработки исходных данных, безусловно, является усилением классического подхода к применению машинного обучения. Более того, комбинация методов факторного анализа и классической нормализации и стандартизации может дать существенный результат во времени решения задачи, при этом качество модели предсказания не меняется, но качество интерпретации результатов мониторинга для пользователя явно повышается.

Следует повторить, что исторически алгоритмы бустинга, как одного из наиболее подходящего для численных данных метода машинного обучения, исследователи старались усиливать путем оптимального комбинирования классификаторов, а на следующей стадии развития [9] — путем оптимального комбинирования функций потерь для разных классификаторов из имеющегося ансамбля классификаторов. В статье рассматривается использование факторного анализа как элемента комбинированного подхода первичной обработки данных на этапе, предшествующем обучению модели, и позволяющему:

- упростить саму модель обучения;
- повысить интерпретируемость данных для пользователя;
- высвободить ресурсы вычислительного комплекса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Большаков, М. А. Сравнительный анализ методов машинного обучения для оценки качества ИТ-услуг / М. А. Большаков, И. А. Молодкин, С. В. Пугачев // Защита информации. Инсайд. 2020. № 4 (94). С. 36–43.

2. Шеннон, К. Э. Работы по теории информации и кибернетике: Сборник статей: Пер. с англ. / Под ред. Р. Л. Добрушина и О. Б. Лупанова. — Москва: Изд-во иностранной литературы, 1963. — 829 с.

3. Хайкин, С. Нейронные сети: Полный курс. Второе издание = Neural Networks: A Comprehensive Foundation. Second Edition / С. Хайкин; пер. с англ. Н. Н. Куссуль и А. Ю. Шелестова. — Москва: Вильямс, 2006. — 1104 с.

4. Большаков, М. А. Подготовка данных системы мониторинга ИТ-инфраструктуры для моделей выявления критических состояний на основе нейросетей // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. № 4. С. 65–71. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10280.

5. Kaiser, H. F. A Second Generation Little Jiffy // Psychometrika. 1970. Vol. 35, Is. 4. Pp. 401–415. DOI: 10.1007/BF02291817.

6. Вращение факторов для факторного анализа // IBM Documentation — Обновлено 22.03.2021. URL: [http://www.ibm.com/docs/ru/spss-statistics/25.0.0?topic=SSLVMB\\_25.0.0/spss/base/idh\\_fact\\_rot.html](http://www.ibm.com/docs/ru/spss-statistics/25.0.0?topic=SSLVMB_25.0.0/spss/base/idh_fact_rot.html) (дата обращения 10.11.2022).

7. Бююль, А. SPSS: Искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей = SPSS Version 10. Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows: Пер. с немецкого / А. Бююль, П. Цёфель. — Санкт-Петербург: ДиаСофтЮП, 2005. — 608 с.

8. How to Perform Exploratory Factor Analysis (EFA) using SPSS // ResearchWithFawad. URL: <http://researchwithfawad.com/index.php/lp-courses/data-analysis-using-spss/how-to-perform-exploratory-factor-analysis-using-spss> (дата обращения 12.11.2022).

9. Jeon, Y.-S. FlexBoost: A Flexible Boosting Algorithm with Adaptive Loss Functions / Y.-S. Jeon, D.-H. Yang, D.-J. Lim // IEEE Access. 2019. Vol. 7. Pp. 125054–125061. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2938356.

# Analysis to Reduce the Dimensionality of Initial IT Infrastructure Monitoring Data

M. A. Bolshakov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
Saint Petersburg, Russia  
bolshakovm@yandex.ru

**Abstract.** Discusses the use of factor analysis to reduce the dimensionality of the initial IT infrastructure monitoring data. The theoretical foundations of factor analysis and basic terminology are given. The performance of factor analysis using the IBM SPSS package on real monitoring data with a reduction of 6.5 times is shown. The advantages of using factor analysis to reduce the load on the computer system by reducing the data dimension are substantiated.

**Keywords:** factor analysis, monitoring, IT infrastructure, data size reduction.

## REFERENCES

1. Bolshakov M. A., Molodkin I. A., Pugachev S. V. Comparative Analysis of Machine Learning Methods to Assess the Quality of IT Services [Sравnitelnyy analiz metodov mashinnogo obucheniya dlya otsenki kachestva IT-uslug], *Zashita informacii. Inside [Zashchita informatsii. Insayd]*, 2020, No. 4 (94), Pp. 36–43.
2. Shannon C. E. Works on information theory and cybernetics [Raboty po teorii informatsii i kibernetike]. Moscow, Foreign Literature Publishing House, 1963, 829 p.
3. Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. Second Edition [Neyronnye seti: Polnyy kurs. Vtoroe izdanie]. Moscow, Williams Publishing House, 2006, 1104 p.
4. Bolshakov M. A. Preparation of Data Monitoring System of IT Infrastructure for Critical State Detection Models Based on Neural Networks [Podgotovka dannykh sistemy monitoringa IT-infrastruktury dlya modeley vyyavleniya kriticheskikh sostoyaniy na osnove neyrosetey], *High Technologies in Earth Space Research [Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli]*, 2019, No. 4, Pp. 65–71. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10280.
5. Kaiser H. F. A Second Generation Little Jiffy, *Psychometrika*, 1970, Vol. 35, Is. 4, Pp. 401–415. DOI: 10.1007/BF02291817.
6. Rotation of Factors for Factor Analysis [Vrashchenie faktorov dlya faktornogo analiza], *IBM Documentation*. Last update at March 22, 2021. Available at: [http://www.ibm.com/docs/ru/spss-statistics/25.0.0?topic=SSLVMB\\_25.0.0/spss/base/idh\\_fact\\_rot.html](http://www.ibm.com/docs/ru/spss-statistics/25.0.0?topic=SSLVMB_25.0.0/spss/base/idh_fact_rot.html) (accessed 10 Nov 2022).
7. Bühl A., Zöfel P. SPSS: The Art of information processing. Analysis of statistical data and recovery of hidden patterns [SPSS: Iskusstvo obrabotki informatsii. Analiz statisticheskikh dannykh i vosstanovlenie skrytykh zakonmernostey]. Saint Petersburg, DiaSoft, 2005, 608 p.
8. How to Perform Exploratory Factor Analysis (EFA) using SPSS, *ResearchWithFawad*. Available at: <http://research-withfawad.com/index.php/lp-courses/data-analysis-using-spss/how-to-perform-exploratory-factor-analysis-using-spss> (accessed 12 Nov 2022).
9. Jeon Y.-S., Yang D.-H., Lim D.-J. FlexBoost: A Flexible Boosting Algorithm with Adaptive Loss Functions, *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, Pp. 125054–125061. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2938356.



# Когнитивность как фактор сложности разработки обучающих систем

М. А. Крылов, к.и.н. А. В. Забродин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

Санкт-Петербург, Россия

Mihailkrylov8189@gmail.com, zabrodin@pgups.ru

**Аннотация.** Рассматривается когнитивность, ее влияние на процесс обучения, особенности создания предметно-ориентированных обучающих систем, а также актуальность создания обучающих систем, основанных на когнитивном подходе. Представлена авторская модель обучающей программы по английскому языку, использующей психологические тесты для определения когнитивного портрета пользователя, формирования индивидуального подхода в его обучении в целях достижения более высокого результата обучения когнитивного развития.

**Ключевые слова:** когнитивность, когнитивный подход, предметно-ориентированная компьютерная обучающая система, внимание, работоспособность, когнитивный профиль, клиент-серверная архитектура, модульная система.

## ВВЕДЕНИЕ

Основная цель обучения «заключается в эффективной передаче наиболее ценного и актуального опыта, накопленного предыдущими поколениями, так, чтобы ученики смогли максимально качественно овладеть им. При этом, продвигаясь по пути приумножения знаний, они на долгие годы сохранили бы любовь к обучению, смогли найти собственное «Я» в этом мире, максимально полно раскрыть свой личностный потенциал и реализовать его с пользой для себя и общества» [1]. Стремительное развитие научно-технического прогресса оказывает существенное влияние на различные сферы человеческой деятельности в связи с интенсивным внедрением новых, постоянно меняющихся технологий, что, безусловно, предъявляет ряд требований к человеку, живущему в XXI веке. Именно из-за этого в последние годы появилось так много образовательных курсов, стажировок, практикумов, обучающих вебинаров. Цифровое образование стало играть весомую роль в жизни современного человека.

## ОСОБЕННОСТИ ОБУЧЕНИЯ

Одним из эффективных средств организации современного обучения является предметно-ориентированная компьютерная обучающая система. Это программные средства профессиональной подготовки, состоящие из электронных учебников и набора специализированных тренажеров. Такие системы позволяют комплексно изучить предоставляемый материал и выработать у обучающихся необходимые навыки и умения. При этом сложность создания современной обучающей программы состоит в том, что к продукту предъявляются высокие требования: общепонятность с подробным изложением и дроблением на части учебного материала; определенность логической структуры подачи учебного материала, грамотный методический отбор упражнений, заданий, иллюстраций, дидактических игр;

результативность усвоения учебного материала на заданном уровне. Такие программы обучения пользуются большой популярностью, так как у их пользователей не хватает времени самостоятельно находить и изучать интересующую их информацию.

Если не получается увеличить количество времени, затрачиваемого на образовательный процесс, нужно улучшить качество обучения в доступную единицу времени. Это возможно при построении образовательного процесса на основе когнитивного подхода. Как известно, успеваемость зависит от когнитивного развития конкретного человека. Данная зависимость выявлена и описана в работах отечественных и зарубежных психологов: Л. С. Выготского, А. Р. Лурия, В. В. Давыдова, Н. В. Бордовской, А. А. Ренана [2–10]. Согласно выводам А. Р. Лурия «...учебный процесс необходимо ориентировать на развитие высших психических функций обучающихся».

Наглядным примером предметно-ориентированной компьютерной обучающей системы может быть приложение для изучения иностранного языка. Задания для учеников, ход занятий, система оценивания, способы передачи информации будут определяться исходя из психологического тестирования учащихся, которое поможет установить исходный уровень развития когнитивных способностей человека перед началом учебного процесса; выявить первичную, базовую работоспособность нервной системы, лежащей в основе любой деятельности, в том числе и обучения; уровень развития некоторых психических процессов, таких как память, внимание, мышление, тип интеллекта каждого пользователя; сферу его интересов и предпочтений и то, каким образом ему проще усваивать, воспринимать, запоминать и перерабатывать информацию.

## КОГНИТИВНОСТЬ

Когнитивность в узком смысле — это способность к ответственному восприятию и переработке внешней информации, в то время как в широком смысле это акт познания. Термин «когнитивный» трактуется как способствующий познанию, познавательной деятельности субъектов обучения, включающей восприятие, распознавание, запоминание, мышление [11]. Он получил широкое распространение в связи с такими научными направлениями, как когнитивистика и когнитивная психология, которая изучает прием, хранение, переработку, воспроизведение и использование информации, а также объясняет поведение человека на их основе. Когнитивная психология использует естественный подход, избегает метафорического описания психологических явлений. Она изучает то, как получают информацию о мире, как она представляется в сознании человека, как

хранится в памяти и как преобразуется в знания. Среди приоритетных целей применения когнитивного подхода в образовании М. Е. Бершадский [12] выделяет когнитивное развитие учащихся (развитие когнитивных способностей обучающегося на уровне не ниже статистической нормы), присвоение знаний и формирование способов деятельности в соответствии с требованиями обучения, формирование информационной компетентности, под которой понимается совокупность умений использовать информацию, поступающую из различных источников, и формирование критического мышления. При этом основной задачей когнитивного подхода в образовании является создание условий для понимания каждым учеником воспринимаемой информации, ее максимально быстрого, легкого, долговременного усвоения и способности к дальнейшему использованию. Таким образом, идея создания обучающей системы (приложения), основанной на когнитивном подходе к образовательному процессу, является актуальной и востребованной.

В качестве теста для изучения базовой работоспособности нервной системы человека можно взять тест Э. Ландольта «Диагностика работоспособности». Методика Э. Ландольта относится к группе корректурных тестов. В литературе можно найти различные подходы к оценке диагностической направленности данной группы тестов. Многие авторы (Б. Бурдон [13, 14], В. Шульте [15], Г. Мюнстенберг [16] и др.) рассматривают их как методы диагностики различных параметров внимания [17], другие — как методы определения психомоторного темпа [18]. А некоторые авторы (например, Э. Крепелин [19]) считают корректурные тесты методами выявления состояния работоспособности человека, его утомляемости и других трудовых качеств. В. Н. Сыроев отмечает, что «...эффективность и стиль всей жизнедеятельности человека в целом зависит от того, на какое «волевое усилие» способна его нервная система, как долго она может работать «не уставая» [20, 21]. В данном случае тест Э. Ландольта представляет собой невербальный тест достижений, в ходе проведения которого изучается базовая, первичная работоспособность, лежащая в основе любой деятельности. Особенности этой базовой

работоспособности проявляются косвенно, через деятельность, суть которой состоит в восприятии и переработке информации в соответствии с определенными правилами.

Задание теста состоит в том, чтобы с максимальной скоростью просматривать строчки с кольцами, при этом зачеркивать кольца с определенным расположением разрыва. Через каждые 2 минуты после начала прохождения тестирования испытуемому подается команда «черта», по которой он должен поставить вертикальную черту за последним просмотренным к этому моменту кольцом и, не останавливаясь, продолжать работу дальше. По истечении 10 минут тестирование завершается. Далее происходит подсчет полученных результатов с помощью формул, и формируется итоговое заключение, включающее необходимые показатели. В электронном виде это может выглядеть следующим образом (рис. 1–3).

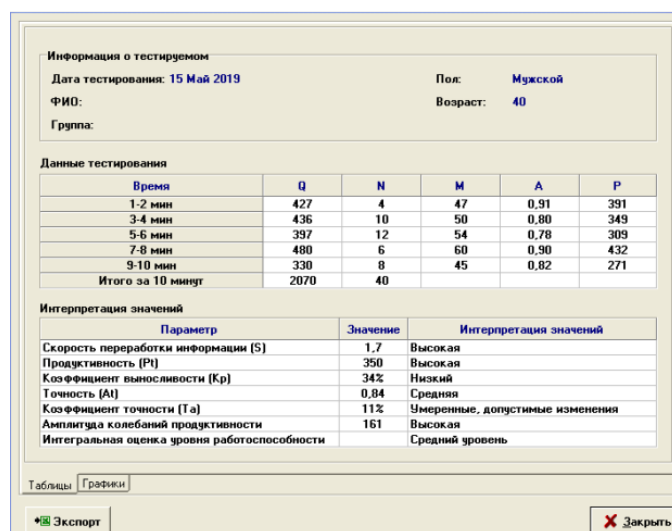


Рис. 1. Образец результатов тестирования по тесту Ландольта

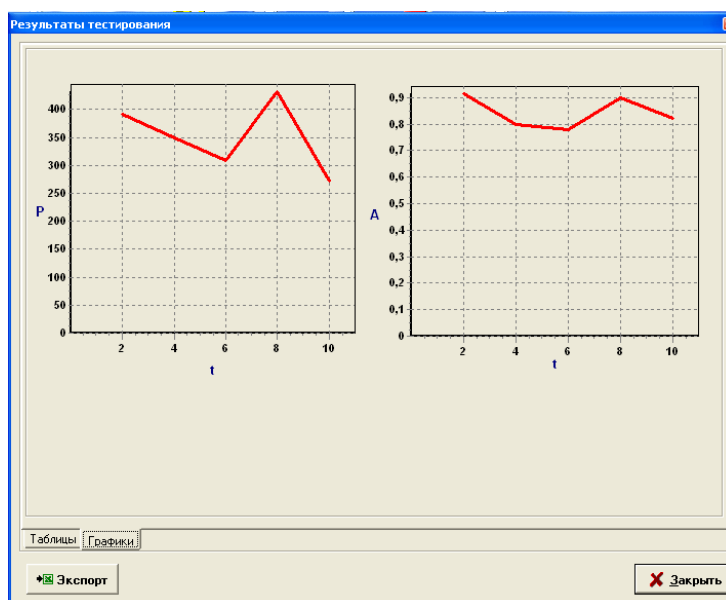


Рис. 2. График изменения показателей продуктивности и точности

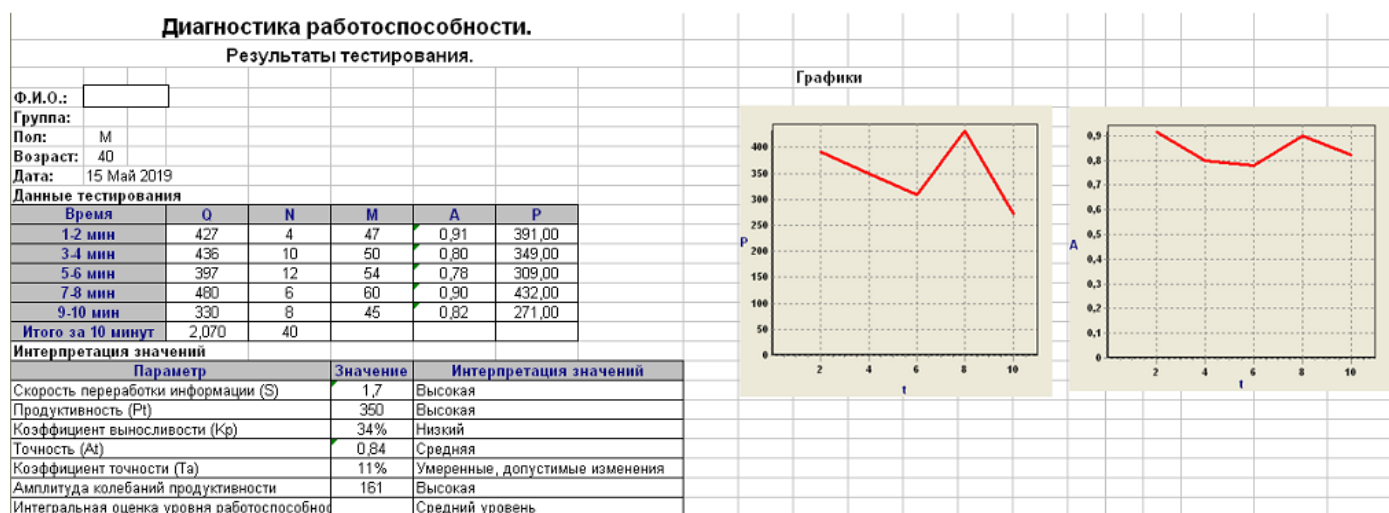


Рис. 3. Экспортированные в программу Excel результаты по тесту Ландольта

В результате тестирования мы получим два количественных (скорость переработки информации и выносливость) и два качественных (средняя точность и коэффициент точности) показателя работоспособности, которые очень важны для построения будущего образовательного процесса. В [21] В. Н. Сысоев, ссылаясь на схему для анализа личности Хосковцева, для характеристики личностных и трудовых качеств, обследуемых по показателям работоспособности, выделяет четыре группы:

1. С хорошими количественными (продуктивность) и качественными (точность) результатами работы. Хорошая результативность по обоим параметрам позволяет предположить у обследуемого высокую скорость протекания мыслительных процессов и процессов переработки информации, что составляет основу высокой продуктивности деятельности, силу воли, хорошее внимание, способность к длительному сосредоточению и выполнению большого количества заданий в единицу времени, хорошую саморегуляцию и умение владеть собой, внутреннюю дисциплину, что позволяет прогнозировать успешность процесса обучения. Эти люди могут эффективно выполнять задания в повышенном темпе.

2. С хорошими качественными и слабыми количественными результатами работы. Такое сочетание свидетельствует об ориентации человека преимущественно на безошибочность работы. При слабой выносливости быстро наступает утомление. В данном случае можно предположить наличие у обследуемого таких личностных особенностей, как добросовестность, старательность, терпеливость, чувство ответственности и склонность к пунктуальности. Такой ученик будет усваивать материал медленнее, но тщательнее. При слабых показателях коэффициента выносливости необходимо предусмотреть возможность отдыха.

3. С хорошими количественными и слабыми качественными результатами работы. Данное сочетание свидетельствует об ориентации обследуемого преимущественно на высокую скорость выполнения в ущерб безошибочности и качеству усвоения. При выполнении заданий человек допускает большое количество ошибок, имеет особенность неточно усваивать новый материал. Это позволяет предположить такие личностные черты, как импульсивность,

самоуверенность, возможно легкомысленность и поверхностное отношение к выполнению заданий. Здесь становится очевидным, что индивидуальный стиль учебной деятельности, позволяющий скорректировать недостаточную точность, должен включать обязательную проверку выполненных частей работы и дополнительное выполнение заданий, в которых были допущены ошибки.

4. Со слабыми количественными и качественными результатами работы. Такие результаты могут демонстрировать люди, которые не способны к волевому усилию, неаккуратны, внутренне недостаточно уравновешены, не уверены в себе, тревожны. Иногда это может быть связано с заниженными интеллектуальными способностями. Лица с низким уровнем выносливости быстро устают и снижают продуктивность работы. Инертность нервной системы может стать причиной неуспеваемости при обучении, если данная особенность не учитывается. Для таких людей важна стабильная по содержанию деятельность с умеренной интенсивностью поступления новой информации и возможностью периодических небольших моментов отдыха. Проявить свои сильные стороны (способности, умения, навыки и др.) они могут только в спокойной обстановке: действуя в своем, соответствующем их нейрофизиологическим особенностям, ритме.

Таким образом, полученные с помощью теста Ландольта результаты могут помочь в формировании индивидуального подхода к осуществлению образовательного процесса: подбору оптимального объема изучаемого материала, подбору необходимого количества и качества тренировочных и контрольных упражнений, а также необходимого времени для усвоения новых знаний.

Учитывая вышесказанное, в архитектуре разрабатываемого приложения предполагается сформировать отдельный психологический модуль, в который кроме теста Ландольта войдут и другие методики, изучающие уровень внимания, памяти, мышления, на основе которых и будет построен базовый когнитивный профиль пользователя. Использование (применение) психологического модуля предполагается в середине обучения или после завершения определенного этапа обучения чтобы проследить динамику когнитивного развития пользователя. В то же

время В. Н. Сысоев [21] отмечает, что высокая продуктивность, выносливость, точность, надежность работы, доступные человеку в соответствии с его психофизиологическими особенностями, могут не проявиться в реальной учебной деятельности, если она не мотивирует его своим содержанием и/или вознаграждением, то есть не является мотивационно значимой. Именно поэтому так важно при создании обучающей программы тщательно подбирать и

формировать материал с учетом индивидуальных предпочтений и особенностей.

**АВТОРСКАЯ МОДЕЛЬ-СХЕМА ОБУЧАЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ**

Для создания обучающей программы по английскому языку, основанной на когнитивном подходе, была разработана структурная модель-схема приложения «ThinkYou», представленная на рисунке 4.

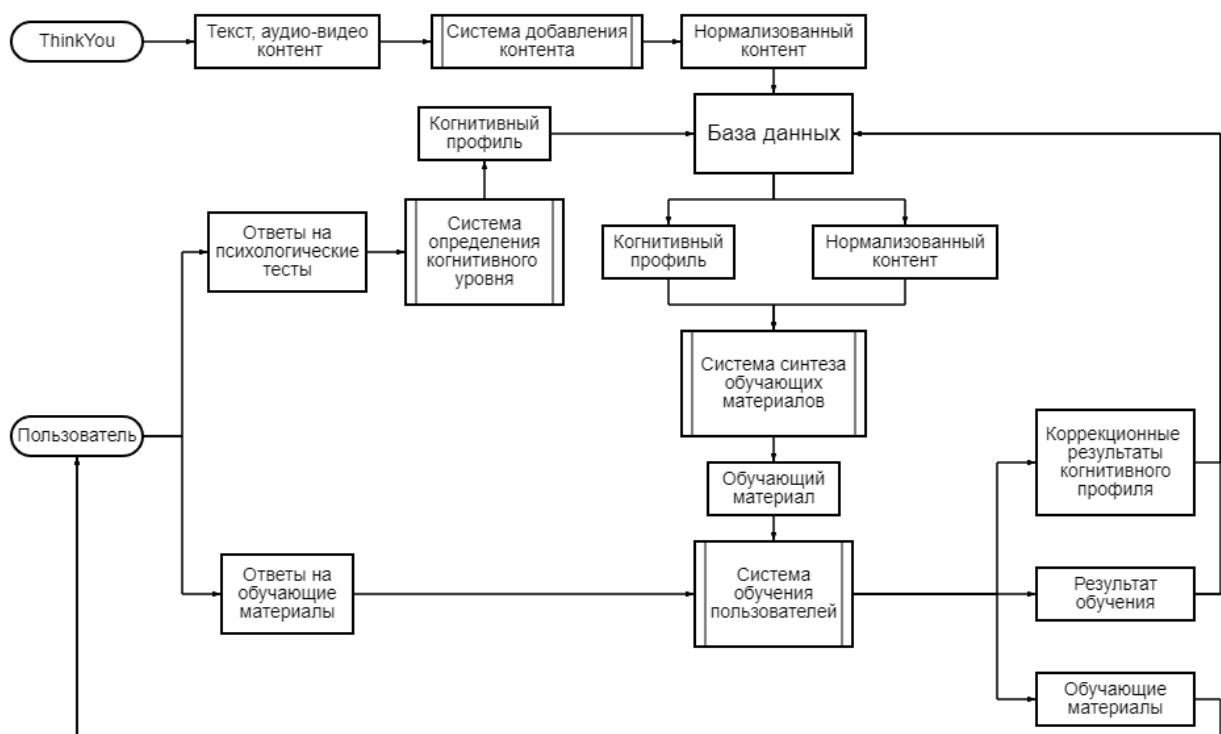


Рис. 4. Структурная модель-схема приложения «ThinkYou»

Данная программа отличается от уже существующих обучающих приложений тем, что в нее добавлены психологические тесты и когнитивный профиль, на основе которых станет возможным сформировать индивидуальный подход к образованию в цифровом виде. Задачей является не только обучить пользователей иностранному языку, но и улучшить их когнитивные способности. Это возможно путем синтеза заданий по английскому языку и психологических упражнений, направленных на развитие памяти, внимания, мышления.

Программа построена по модульному принципу, каждый модуль выполняет свой определенный функционал и может использоваться в одном или нескольких контекстах алгоритма выполнения.

Система добавления контента отвечает за заполнение базы данных информацией, предоставляемой создателями программы. Также в базе данных будет храниться информация о когнитивном профиле пользователя и результатах его обучения. При запросе с клиентской части приложения, из базы данных будут предоставляться обучающие материалы, за подготовку которых ответственна *система синтеза*. Через нее происходит запрос информации из базы данных о когнитивном профиле пользователя. На основе полученных данных подбирается необходимый материал. После того как пользователь пройдет тестирование по изу-

ченной теме, он сможет увидеть свои результаты. Результаты тестирований будут храниться в базе данных для отслеживания статистики.

Особое внимание в приложении уделено тестированию обучающихся и созданию индивидуального когнитивного профиля. До начала обучения пользователь должен пройти психологические тесты, на основе которых программа создаст приблизительный когнитивный портрет человека. При этом необходимо разработать алгоритм конвертации данных, полученных из психологических тестов в данные, которые будет хранить когнитивный профиль пользователя. На их основе программа выберет один из нескольких доступных вариантов теоретического материала, отличающихся объемом, подробностью, а также примерами. Так, если пользователь интересуется спортом, примеры будут основываться на спортивной тематике. Благодаря такому подходу человек быстрее, проще и с большим интересом будет изучать предоставляемый учебный материал. Но в этом и заключается главная сложность: необходимо разработать алгоритм подбора учебных материалов и заданий, основываясь на результатах тестирований, хранящихся в когнитивном профиле. Потребуется тесное сотрудничество с педагогами, которые будут разрабатывать учебный материал, а также психологами. Необходимо подобрать оптимальное количество заданий, их направленность. Тесты по пройденному

материалу не будут иметь ограничений на количество заданий: на каждый тест отведено определенное время, т. е. количество выполненных заданий зависит от самого пользователя. Если человек обладает хорошими количественными и слабыми качественными результатами работы, после прохождения контрольного теста по изученному материалу программа предложит заново выполнить задания, в которых были допущены ошибки. Если пользователь обладает слабыми количественными и хорошими качественными результатами работы, программа предложит пользователю решить дополнительные задания для достижения средних количественных результатов для закрепления материала.

Разработка серверной части данного приложения предполагается на языке программирования Java ввиду его платформенезависимости, а также наличию таких библиотек, как Jackson, HttpClient, Log4j, DBCP, а также удобных для разработки фреймворков. В реализации поставленных задач поможет фреймворк Spring boot, который является надстройкой над Spring Framework. Он позволит уменьшить количество кода, оптимизировать работу программы, а также упростит настройку приложения при разработке. Система сборки Maven позволит автоматизировать сборку проекта, а также упростит подключение и управление зависимостями. Из-за большого количества данных, полученных после проведения различных тестов, а также из-за их сложной структуры целесообразно будет использовать объектно-ориентированную базу данных. В ней отсутствует проблема несоответствия модели данных в приложении и БД, все данные сохраняются в БД в том же виде, что и в модели приложения. Не требуется отдельно поддерживать модель данных на стороне СУБД, также все объекты на уровне источника данных строго типизированы.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При создании обучающей системы, учитывающей когнитивные способности человека, требуется определенный (нетривиальный) подход. Возможно возникновение трудностей в связи с тем, что идея находится на стыке наук и предполагает первоначальную подготовку к разработке группой специалистов разных областей: психологов, педагогов, лингвистов, программистов, дизайнеров и, возможно, других. Непосредственно техническое исполнение может столкнуться с такими проблемами, как внедрение в программу психологических тестов и учет ответов обучающихся, разработка алгоритма для создания индивидуального образовательного материала, основываясь на результатах тестирования, формирование структуры базы данных и запросов к ней, выбор языка программирования и стека технологий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Плигин, А. А. Психология познавательных стратегий школьников в индивидуализации образования: дис. на соиск. учен. степ. докт. психол. наук: 19.00.07 / Плигин Андрей Анатольевич; Московский психолого-социальный институт. — Москва, 2009. — 518 с.
2. Выготский, Л. С. Мышление и речь. — Изд. 5-е, испр. — Москва: Лабиринт, 1999. — 352 с.
3. Выготский, Л. С. Психология развития человека. — Москва: Смысл: Эксмо, 2005. — 1136 с. — (Библиотека всемирной психологии).

4. А. Р. Лурия и современная психология / Под ред. Е. Д. Хомской, [и др.]. — Москва: Изд-во МГУ, 1982. — 256 с.
5. Лурия, А. Р. Лекции по общей психологии. — Санкт-Петербург: Питер, 2006. — 320 с. — (Мастера психологии).
6. Лурия, А. Р. Мозг человека и психические процессы: в 2 т. — Москва: Педагогика, 1963, 1970. — 479, 496 с.
7. Давыдов, В. В. Теория развивающего обучения. — Москва: ИНТОР, 1996. — 542 с.
8. Давыдов, В. В. Виды обобщения в обучении: Логико-психологические проблемы построения учебных предметов. — 2-е изд. — Москва: Педагогическое общество России, 2000. — 480 с.
9. Современные образовательные технологии: Учебное пособие / Под ред. Н. В. Бордовской. — 3-е изд., стер. — Москва: КНОРУС, 2018. — 432 с. — (Бакалавриат).
10. Реан, А. А. Психология и педагогика: Учебник для вузов / А. А. Реан, Н. В. Бордовская, С. И. Розум. — Санкт-Петербург: Питер, 2000. — 432 с. — (Учебник нового века).
11. Идиатуллин, В. С. Когнитивная технология обучения студентов. — Ижевск: Ижевская гос. сельскохозяйств. академия, 2002. — 180 с.
12. Когнитивная педагогика: технологии электронного обучения в профессиональном развитии педагога: Монография / С. Ф. Сергеев, М. Е. Бершадский, Е. А. Бершадская, [и др.]. — Якутск: Ин-т гуманитарных исследований и проблем малочисленных народов Севера Сибирского отд. Рос. ак. наук, 2016. — 336 с.
13. Рубинштейн, С. Я. Экспериментальные методики патопсихологии. — Москва: ЭКСМО-Пресс, 1999. — 448 с. — (Мир психологии).
14. Рогов, Е. И. Настольная книга практического психолога в образовании: Учебное пособие. — Москва: Гуманитарный издательский центр «ВЛАДОС», 1995. — 528 с.
15. Зиганов, М. А. Скорочтение. — Москва: ЭКСМО, 2013. — 224 с. — (Мозг на 100 %).
16. Мюнстерберг, Г. Основы психотехники / Пер. с немецкого под ред. Б. Н. Северного и В. М. Экземплярского. — 2-е изд. — Москва: Русский Книжник, 1924, 1925. — 136, 148 с.
17. Баскакова, И. Л. Внимание как показатель работоспособности в норме и патологии / И. Л. Баскакова, Л. Д. Закаева // Вопросы психологии познавательной деятельности: Сборник научных трудов. — Москва: Моск. гос. пед. ин-т им. В. И. Ленина, 1979. — С. 10–14.
18. Ильин, Е. П. Психофизиология состояний человека. — Санкт-Петербург: Питер, 2005. — 412 с.
19. Елисеев, О. П. Оценка умственной работоспособности по Э. Крепелину // Елисеев, О. П. Практикум по психологии личности. — 3-е изд., перераб. — Санкт-Петербург: Питер, 2010. — С. 199–200. — (Практикум по психологии).
20. Аверьянов, В. С. Физиологические механизмы работоспособности / В. С. Аверьянов, К. Г. Капустин, О. В. Виногодова // Физиология трудовой деятельности: Монография / [Редкол.: В. И. Медведев, [и др.]]. — Санкт-Петербург: СПИКФ Наука, 1993. — С. 62–82. — (Основы современной физиологии).
21. Сысоев, В. Н. Тест Э. Ландольта: диагностика работоспособности: Методическое руководство. — Санкт-Петербург: Институт практической психологии «Иматон», 2003. — 31 с.

# Cognitiveness as a Factor in the Complexity of Developing Learning Systems

M. A. Krylov, PhD A. V. Zabrodin

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
Saint Petersburg, Russia

Mihailkrylov8189@gmail.com, zabrodin@pgups.ru

**Abstract.** The article considers cognitiveness, its influence on the learning process, the features of creating subject-oriented learning systems, as well as the relevance of creating learning systems based on a cognitive approach. The article presents the author's model of the English language program based on psychological tests to determine the cognitive portrait of the user, the formation of an individual approach in his training in order to achieve higher cognitive development.

**Keywords:** cognitiveness, cognitive approach, subject-oriented computer learning system, attention, efficiency, cognitive profile, client-server architecture, modular system.

## REFERENCES

1. Pligin A. A. Psychology of Cognitive Strategies of Schoolchildren in the Individualization of Education [Psikhologiya poznavatelnykh strategiy shkolnikov v individualizatsii obrazovaniya]: diss. on competition of a scientific degree Grand PhD (Psychol.). Moscow, 2009, 518 p.
2. Vygotsky, L. S. Thinking and speech [Myshlenie i rech]. Moscow, Labirint Publishing House, 1999, 352 p.
3. Выготский, Л. С. Psychology of human development [Psikhologiya razvitiya cheloveka]. Moscow, EKSMO, 2005, 1136 p.
4. Khomskaya E. D., et al. (eds.) A. R. Luria and modern psychology [A. R. Luriya i sovremennaya psikhologiya]. Moscow, Lomonosov Moscow State University, 1982, 256 p.
5. Luria A. R. Lectures on general psychology [Lektsii po obshchey psikhologii]. Saint Petersburg, Piter Publishing House, 2006, 320 p.
6. Luria A. R. The human brain and mental processes [Mozg cheloveka i psikhicheskie protsessy]. In 2 volumes. Moscow, Pedagogika Publishing House, 1963, 479 p.; 1970, 496 p.
7. Davydov V. V. Developmental learning theory [Teoriya razvivayushchego obucheniya]. Moscow, INTOR Publishing House, 1996, 542 p.
8. Davydov V. V. Types of generalization in teaching: Logical and psychological problems of constructing educational subjects [Vidy obobshcheniya v obuchenii: Logiko-psikhologicheskie problemy postroeniya uchebnykh predmetov]. Moscow, Pedagogical Society of Russia, 2000, 480 p.
9. Bordovskaya N. V. (ed.) Modern educational technologies: Study guide [Sovremennye obrazovatelnye tekhnologii: Uchebnoe posobie]. Moscow, KnoRus Publishing House, 2018, 432 p.
10. Rean A. A., Bordovskaya N. V., Rozum S. I. Psychology and pedagogy: Textbook for universities [Psikhologiya i pedagogika: Uchebnik dlya vuzov]. Saint Petersburg, Piter Publishing House, 2000, 432 p.
11. Idiatulin V. S. Cognitive technology for student learning [Kognitivnaya tekhnologiya obucheniya studentov]. Izhevsk, Izhevsk State Agricultural Academy, 2002, 180 p.
12. Sergeev S. F., Bershadsky M. E., Bershadskaya E. A., et al. Cognitive pedagogy: E-learning technologies in the professional development of a teacher: Monograph [Kognitivnaya pedagogika: tekhnologii elektronnoy obucheniya v professionalnom razvitiy pedagoga: Monografiya]. Yakutsk, Institute for Humanitarian Research and North Indigenous People Problems of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016, 336 p.
13. Rubinshteyn S. Ya. Experimental methods of pathopsychology [Eksperimentalnye metodiki patopsikhologii]. Moscow, EKSMO-Press, 1999, 448 p.
14. Rogov E. I. Handbook of practical psychologist in education: Study guide [Nastolnaya kniga prakticheskogo psikhologa v obrazovanii: Uchebnoe posobie]. Moscow, VLADOS Publishing Center, 1995, 528 p.
15. Ziganov M. A. Speed reading [Skorochtenie]. Moscow, EKSMO, 2013, 224 p.
16. Münsterberg H. Fundamentals of psychotechnics [Osnovy psikhotehniki]. Moscow, Russkiy Knizhnik Publishing House, 1924, 136 p.; 1925, 148 p.
17. Baskakova I. L., Zakaeva L. D. Attention as an Indicator of Working Capacity in Normal and Pathological Conditions [Vnimanie kak pokazatel rabotosposobnosti v norme i patologii], *Questions of the Psychology of Cognitive Activity: Collection of scientific papers [Voprosy psikhologii poznavatelnoy deyatel'nosti: Sbornik nauchnykh trudov]*. Moscow, Lenin Moscow State Pedagogical Institute, 1979, Pp. 10–14.
18. Ilin E. P. Psychophysiology of human conditions [Psikhofiziologiya sostoyaniy cheloveka]. Saint Petersburg, Piter Publishing House, 2005, 412 p.
19. Eliseev O. P. Assessment of Mental Performance by E. Krepelin [Otsenka umstvennoy rabotosposobnosti po E. Krepelinu]. In: Eliseev O. P. A workshop on personality psychology [Praktikum po psikhologii lichnosti]. Saint Petersburg, Piter Publishing House, 2010, Pp. 199–200.
20. Averyanov V. S., Kapustin K. G., Vinogradova O. V. Physiological Mechanisms of Working Capacity [Fiziologicheskie mekhanizmy rabotosposobnosti] In: Medvedev V. I., et al. (ed. board) Physiology of labor activity: Monograph [Fiziologiya trudovoy deyatel'nosti: Monografiya]. Saint Petersburg, Nauka Publishers, 1993, Pp. 62–82.
21. Sysoev V. N. E. Landolt's test: Diagnostics of working capacity: Methodological guide [Test E. Landolta: diagnostika rabotosposobnosti: Metodicheskoe rukovodstvo]. Saint Petersburg, Institute of Practical Psychology «Imaton», 2003, 31 p.

# Обоснование экономической эффективности дистанционного обучения на основе дорожного центра обучения при вузе

к.т.н. О. Н. Куранова, к.воен.н. А. И. Дергачев, А. И. Кожевников, О. В. Петрова, В. И. Носонов  
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I  
Санкт-Петербург, Россия  
olga\_kuranova@mail.ru, d\_ader@mail.ru, kai45@mail.ru, olga\_sivers@mail.ru, vinvin2352@gmail.com

**Аннотация.** Как показывает практика, наибольший объем перевозок приходится на железнодорожный транспорт. При этом заданный объем перевозок может быть выполнен в установленные сроки только при наличии соответствующих возможностей железнодорожного транспорта, которые, в свою очередь, определяются не только уровнем развития технической базы и способами организации движения, но и уровнем подготовки персонала, непосредственно отвечающего за его эксплуатацию.

Таким образом, это обуславливает необходимость обеспечения достаточного уровня подготовки руководящего состава, специалистов различных департаментов и служб, а также работников различных предприятий и подразделений ОАО «РЖД». Наличие подготовленного персонала позволит повысить эффективность использования производственных мощностей железнодорожного транспорта по выполнению различных перевозок в заданных объемах и точно в установленные сроки на любые направления. Вместе с тем, сложившаяся к настоящему времени система подготовки и повышения квалификации перечисленного выше персонала железнодорожного транспорта недостаточно отвечает предъявляемым требованиям.

В этих условиях в качестве одной из основных задач, которую необходимо решать органам управления на железнодорожном транспорте, выступает необходимость повышения уровня подготовки персонала для выполнения различных задач.

Использование новых информационных нетрадиционных технологий в дистанционном обучении для доподготовки и переподготовки персонала является достаточно перспективным и экономически оправданным. Индекс доходности при различных вариантах больше единицы и даже может быть равен 1,5 для одной дороги.

Экономическая эффективность дистанционного обучения подчитывается по трем взаимообусловленным составляющим: численности обучаемых, стоимости дистанционного курса и относительной доходности для ОАО «РЖД».

**Ключевые слова:** обеспечение отрасли профессиональным человеческим ресурсом, развитие образовательного процесса, создание и развитие адресных программ для закрепления сотрудников на объектах отрасли, сокращение финансовых затрат на доподготовку и переподготовку, экономическая эффективность дистанционного обучения.

## ВВЕДЕНИЕ

Требования к повышению уровня национальной безопасности Российской Федерации определяются рядом объективных факторов. К ним относятся политический экстремизм и сепаратизм, деятельность националистических экстремистских группировок, международный терроризм, борьба за энергетические ресурсы. Особую актуальность

этот вопрос приобретает в условиях проходящего в настоящее время процесса реформирования на транспорте.

Одним из наиболее перспективных направлений повышения уровня готовности персонала к выполнению перевозок может стать дистанционная доподготовка. Ее отличительной особенностью является использование информационных технологий, которые позволяют оперативно организовать процесс обучения без отрыва от производства, а также вне зависимости от географического местоположения обучаемых и самого центра обучения. Сущность дистанционной доподготовки состоит в том, что образовательные услуги могут предоставляться всем пространственно удаленным потребителям в режиме реального времени и в любой форме отображения, включая и непосредственное общение с квалифицированным профессорско-преподавательским составом. При этом предусматривается охват различных уровней органов управления железнодорожным транспортом на основе использования оперативных средств двустороннего обмена информацией и электронных учебных материалов. Доподготовка персонала к выполнению перевозок ведется постоянно в соответствии с утвержденными планами железных дорог по повышению квалификации работников всех категорий.

В настоящее время трудноразрешимой задачей является оценка степени влияния дистанционной доподготовки и переподготовки персонала на безопасность, эксплуатационные показатели дороги по выполнению перевозок в чрезвычайных ситуациях. Вполне возможно, что такое влияние может быть существенным.

На текущий момент информационные технологии в системе подготовки, доподготовки и переподготовки работников железнодорожного транспорта по выполнению перевозок грузов в чрезвычайных ситуациях не получили широкого распространения. Для этого необходим научно-методический аппарат их реализации с убедительным подтверждением эффективности [1].

Масштабность проводимой сегодня реформы железнодорожной отрасли потребовала улучшения качества образовательного уровня специалистов ОАО «РЖД». Подготовка кадров включает в себя следующие составляющие: полноценный охват и непрерывное обучение всего состава специалистов отрасли, обеспечение требуемого качества обучения и оптимизация финансовых затрат на эти цели. При этом одной из основных задач подготовки специалистов является повышение эффективности работы железнодорожного транспорта и сокращение непроизводительных

потерь с целью увеличения доходности этой отрасли экономики и обеспечения безопасности перевозок. Исходя из этого, руководство ОАО «РЖД» уделяет большое внимание доподготовке, повышению квалификации и переподготовке персонала, расходуя на эти цели значительные средства.

Вполне очевидно, что неправильные и неумелые действия работников железнодорожного транспорта при организации эксплуатационной работы могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций, которые сопровождаются человеческими жертвами, значительным материальным ущербом, нанесением вреда окружающей среде, длительными перерывами в движении поездов, что существенно снижает возможности по выполнению всех видов перевозок.

Анализ работ в области оценки возможностей железнодорожного транспорта показал, что характер влияния человеческого фактора или кадрового потенциала исследован недостаточно. В настоящее время степень влияния кадрового потенциала на возможности железнодорожного транспорта можно оценить только по отчетным показателям работы отдельной дороги путем сравнительного анализа наличия и уровня квалификации персонала.

#### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Система подготовки и повышения квалификации персонала железных дорог базируется на решении Коллегии МПС от 27.05.1995 № 29 «О коренном обновлении кадровой политики на железнодорожном транспорте»

В профессиональной подготовке кадров для ОАО «РЖД» основными задачами являются: профессиональная начальная подготовка, обучение вторым профессиям, повышение квалификации путем периодической доподготовки и переподготовки в специализированных учебных центрах и образовательных учреждениях [1, 2]. Возникшая в последние годы проблема рационального использования имеющихся производственных мощностей отрасли для всех видов перевозок не может быть решена без системных исследований в данной предметной области. Для решения таких крупных организационных проблем требуется сосредоточить усилия специалистов различных отраслевых вузов страны, ОАО «РЖД» и Министерства транспорта Российской Федерации.

Озабоченность безопасностью движения и ростом производительности труда на транспорте все чаще исходит из влияния на эти процессы человеческого фактора, то есть квалификации персонала. Федеральной программой обеспечения безопасности на транспорте предусмотрена разработка программ и научно-методического обеспечения для повышения квалификации работников железнодорожного транспорта [1, 2]. Умелые действия персонала железных дорог позволяют сократить число погибших, сохранить здоровье пострадавшим, уменьшить социальный и экономический ущерб, поддерживать на требуемом уровне нормативные показатели возможностей. Особую актуальность это приобретает в чрезвычайных условиях эксплуатационной работы.

Полученные в процессе начальной подготовки общетеоретические знания сравнительно быстро теряются, а количество профессиональных привычек упрощать принимаемые решения накапливается. При определенных условиях

это и является источником происшествий и нарушения правил эксплуатации транспорта, что неизбежно ведет к снижению его возможностей. В сложных условиях эксплуатационной обстановки это может привести к неправильным действиям как органов управления, так и эксплуатационного персонала, что в свою очередь может стать причиной срыва сроков выполнения всех видов перевозок. Следовательно, доподготовку через определенные периоды времени в плановом порядке должны проходить все работники железнодорожного транспорта. В настоящее время этот показатель составляет не более 10 % от общей численности персонала.

Под переподготовкой кадров предлагается понимать обучение работников новым профессиям, обучение с целью допуска к эксплуатации более сложного оборудования, вновь поступившей техники, новых средств управления, а также с целью выдвижения специалистов на более высокие должности, особенно в административно-хозяйственный и управленческий аппарат [3, 4].

Необходимость и целесообразность такого разделения понятия «повышение квалификации персонала» обусловлена также тем, что и по объему изучаемого материала, и по финансированию доподготовка и переподготовка существенно отличаются. Соответственно, для переподготовки кадров требуются образовательные учреждения более высокого уровня, оснащенные новейшей учебно-материальной базой, укомплектованные хорошо подготовленным профессорско-преподавательским составом.

Требования к образовательным учреждениям (перспективы их развития) определяются в процессе реализации исследовательской модели на основе прогнозирования потребности в образовательных услугах по каждому предприятию и по каждой профессии.

Детализация выходных параметров модели дает возможность конкретизировать задачи для образовательных учреждений по уровням и сложности решаемых задач, по значимости категорий обучаемых, реализовать на практике метод аутсорсинга по передаче образовательных услуг. Вполне очевидно, что более глубокая детализация потребности в образовательных услугах ведет к усложнению образовательного процесса и, безусловно, к его удорожанию, но обеспечивается более высокое качество подготовки специалистов. Кажущееся противоречие может быть преодолено за счет внедрения современных информационных технологий на основе дистанционного обучения персонала.

Для эффективного внедрения дистанционного обучения на основе современных информационных технологий необходимо решить ряд организационных вопросов. Предлагаются рассмотреть и сравнивать по эффективности две организационные формы. Одна из них — создание центра дистанционного обучения (КЦДО) в существующих структурах корпорации со всеми преобразованиями и расходами на его функционирование. Второй возможный вариант — создание центра дистанционного обучения для конкретной дороги на базе ведущего отраслевого вуза в регионе (ДЦДО) [5, 6]. Задача этих центров — методическое обеспечение и практическое управление доподготовкой и переподготовкой персонала.

Чтобы обосновать целесообразность и экономическую эффективность функционирования таких центров, необходимо выполнить соответствующие финансово-



экономические расчеты, провести экспериментальные исследования обобщить результаты функционирования этих центров и путем сравнительной оценки рекомендовать для ОАО «РЖД» лучший из них.

ОБОСНОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ

При разработке и сравнительной оценке нескольких вариантов инвестиционного проекта необходимо учитывать влияние изменения объемов продаж на рыночную цену продукции и цены потребляемых ресурсов.

При оценке эффективности инвестиционного проекта соизмерение разновременных показателей осуществляется путем приведения (дисконтирования) их к ценности в начальном периоде. Для приведения разновременных затрат, результатов и эффектов используется норма дисконта  $E$ , равная приемлемой для инвестора норме дохода на капитал [6–8].

Технически приведение к базисному моменту времени затрат, результатов и эффектов, имеющих место на  $t$ -м шаге расчета реализации проекта, удобно производить путем их умножения на коэффициент дисконтирования  $a_t$ , определяемый для постоянной нормы дисконта  $E$  как

$$a_t = \frac{1}{(1 + E)^t}, \quad (1)$$

где  $t$  — номер шага расчета ( $t = 0, 1, 2, \dots, T$ );  
 $T$  — горизонт расчета.

В расчетах предусмотрено приведение к моменту времени  $t = 0$  непосредственно после первого шага. Однако возможно приведение к фиксированному моменту (например, при сравнении проектов, начинающихся в различные моменты времени).

Сравнение различных инвестиционных проектов (или вариантов проекта) и выбор лучшего из них рекомендуется производить с использованием различных показателей, к которым относятся:

- чистый дисконтированный доход (ЧДД) или интегральный эффект;
- индекс доходности (ИД);
- внутренняя норма доходности (ВНД);
- срок окупаемости;
- другие показатели, отражающие интересы участников или специфику проекта.

При использовании показателей для сравнения различных инвестиционных проектов (вариантов проекта) они должны быть приведены к сопоставимому виду.

Чистый дисконтированный доход (ЧДД) определяется как сумма текущих эффектов за весь расчетный период, приведенная к начальному шагу, или как превышение интегральных результатов над интегральными затратами.

Если в течение расчетного периода не происходит инфляционного изменения цен или расчет производится в базовых ценах, то величина ЧДД для постоянной нормы дисконта вычисляется по формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \times \frac{1}{(1 + E)^t}, \quad (2)$$

где  $R_t$  — результаты, достигаемые на  $t$ -м шаге расчета;  
 $Z_t$  — затраты, осуществляемые на том же шаге;

$T$  — горизонт расчета, равный номеру шага расчета, на котором производится ликвидация объекта;

$Z_t = (R_t - Z_t)$  — эффект, достигаемый на  $t$ -м шаге.

Если ЧДД инвестиционного проекта положителен, проект является эффективным (при данной норме дисконта) и может рассматриваться вопрос о его принятии. Чем больше ЧДД, тем эффективнее проект. Если инвестиционный проект будет осуществлен при отрицательном ЧДД, инвестор понесет убытки, то есть проект неэффективен.

На практике часто пользуются модифицированной формулой для определения ЧДД. Для этого из состава  $Z_t$  исключают капитальные вложения и обозначают через  $K_t$  капиталовложения на  $t$ -м шаге, через  $K$  — сумму дисконтированных капиталовложений, то есть

$$K = \sum_{t=0}^T K_t \times \frac{1}{(1 + E)^t}, \quad (3)$$

а через  $Z_{t+}$  — затраты на  $t$ -м шаге при условии, что в них не входят капиталовложения. Тогда формула (2) для ЧДД записывается в виде

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_{t+}) \times \frac{1}{(1 + E)^t} \quad (4)$$

и выражает разницу между суммой приведенных эффектов и приведенной к тому же моменту времени величиной капитальных вложений  $K$ .

В формулах (3)–(6) в конце  $T$ -го (последнего) шага должна учитываться реализация активов (условная). Если же предусматривается действительная ликвидация производства, она должна быть включена в проект. Чистая ликвидационная (остаточная) стоимость объекта получается в результате вычитания расходов по ликвидации из стоимости материальных ценностей, получаемых при ликвидации.

В формулу для  $K$  убыток входит со знаком «плюс», а доход — со знаком «минус».

Индекс доходности (ИД) представляет собой отношение суммы приведенных эффектов к величине капиталовложений:

$$\text{ИД} = \frac{1}{K} \sum_{t=0}^T (R_t - Z_{t+}) \times \frac{1}{(1 + E)^t}. \quad (5)$$

Индекс доходности тесно связан с ЧДД. Он строится из тех же элементов, и его значение связано со значением ЧДД: если ЧДД положителен, то ИД  $> 1$  и наоборот. Если ИД  $> 1$ , то проект эффективен, если ИД  $< 1$  — неэффективен.

Внутренняя норма доходности (ВНД) представляет собой ту норму дисконта  $E_{ВН}$ , при которой величина приведенных эффектов равна приведенным капиталовложениям. Иными словами, ВНД является решением уравнения

$$\sum_{t=0}^T \frac{R_t - Z_{t+}}{(1 + E_{ВН})^t} = \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1 + E_{ВН})^t}. \quad (6)$$

Если расчет ЧДД инвестиционного проекта дает ответ на вопрос, является он эффективным или нет при некоторой заданной норме дисконта  $E$ , то ВНД проекта

определяется в процессе расчета и затем сравнивается с требуемой инвестором нормой дохода на вкладываемый капитал.

В случае, когда ВНД равна или больше требуемой инвестором нормы дохода на капитал, инвестиции в данный инвестиционный проект оправданы, и может

рассматриваться вопрос о его принятии. В противном случае инвестиции в проект нецелесообразны.

Если сравнение альтернативных (взаимоисключающих) инвестиционных проектов (вариантов проекта) по ЧДД и ВНД (табл. 1) приводят к противоположным результатам, предпочтение следует отдавать ЧДД.

Таблица 1

Экономическая эффективность дистанционного обучения при снижении доходности (экспериментальные данные)

Число железных дорог	Показатель (всего за период)	Снижение желаемой прибыли		
		Нормальное значение	Снижение на 10%	Снижение на 20%
1	Доходы, млн руб	238,93	233,97	225,86
	Эксплуатационные расходы, млн руб	186,81	183,38	177,57
	Прибыль, млн руб	52,13	50,59	48,29
	Дисконтированный поток реальных денег, млн руб	14,08	13,02	11,47
	Индекс доходности	1,47	1,44	1,39
	ROI, %	0,02	0,02	0,01
2	Доходы, млн руб	427,12	416,71	405,31
	Эксплуатационные расходы, млн руб	355,42	347,33	338,25
	Прибыль, млн руб	71,69	69,39	67,06
	Дисконтированный поток реальных денег, млн руб	29,44	27,85	26,17
	Индекс доходности	1,99	1,94	1,88
	ROI, %	0,03	0,03	0,03
3	Доходы, млн руб	664,90	64,87	624,98
	Эксплуатационные расходы, млн руб	569,13	555,82	536,41
	Прибыль, млн руб	95,77	92,87	88,57
	Дисконтированный поток реальных денег, млн руб	46,38	44,35	41,36
	Индекс доходности	2,56	2,49	2,39
	ROI, %	0,05	0,05	0,05

При использовании ВНД следует соблюдать известную осторожность. Во-первых, она не всегда существует. Во-вторых, уравнение (6) может иметь больше одного решения. Первый случай весьма редок. Во втором корректный расчет ВНД несколько затруднителен, хотя и возможен. В качестве первого приближения в ситуации, когда простой (недисконтированный) интегральный эффект положителен, ряд авторов [1, 3, 6, 7] предлагает принимать в качестве  $E_{ВН}$  значение наименьшего положительного корня уравнения (6).

Срок окупаемости — минимальный временной интервал (от начала осуществления проекта), за пределами которого интегральный эффект становится и в дальнейшем остается неотрицательным. Иными словами, это период, измеряемый в месяцах, кварталах или годах, начиная с которого первоначальные вложения и другие затраты, связанные с инвестиционным проектом, покрываются суммарными результатами его осуществления.

Результаты и затраты, связанные с осуществлением проекта, можно вычислять с дисконтированием или без него. Соответственно, получится два различных срока

окупаемости. Срок окупаемости рекомендуется определять с использованием дисконтирования.

При необходимости учета инфляции формулы (3)–(6) должны быть преобразованы так, чтобы из входящих в них значений затрат и результатов было исключено инфляционное изменение цен, т. е. чтобы величины критериев были приведены к ценам расчетного периода. Это можно выполнить введением прогнозных индексов цен и дефлирующих множителей.

При этом необходимо учитывать изменения цен за счет неинфляционных причин и по-прежнему осуществлять дисконтирование.

Наряду с перечисленными критериями в ряде случаев возможно использование и ряда других: интегральной эффективности затрат, точки безубыточности, простой нормы прибыли, капиталотдачи и т. д. Для применения каждого из них необходимо ясное представление о том, какой вопрос экономической оценки проекта решается с его использованием и как осуществляется выбор решения.

Ни один из перечисленных критериев сам по себе не является достаточным для принятия проекта. Решение об

инвестировании средств в проект должно приниматься с учетом значений всех перечисленных критериев и интересов всех участников инвестиционного проекта. Важную роль в этом решении должна играть также структура и распределение во времени капитала, привлекаемого для осуществления проекта, а также другие факторы, некоторые из которых поддаются только содержательному (а не формальному) учету.

Для оценки эффективности работы ДЦДО ПГУПС по разработанной автором модели необходимо определиться с начальными параметрами модели, в качестве которых могут быть использованы данные о работе ЦИИТО ПГУПС. Для того чтобы оценить все показатели эффективности проектов по созданию двух видов ЦДО, необходимо спрогнозировать работу центра ДО на определенное время.

Для составления прогноза эффективности работы была разработана и реализована на Microsoft VBA модель функционирования работы ДЦДО ПГУПС и КЦДО ОАО «РЖД». Модель описывает полнофункциональную деятельность центра по предоставлению аутсорсинговых услуг ОАО «РЖД» по обучению сотрудников и позволяет сравнить эффективность использования аутсорсинговых услуг сторонней компании с созданием собственного центра дистанционного обучения, а также с применением очной формы подготовки и переподготовки персонала по различным показателям:

- чистого дисконтированного дохода;
- индекса доходности;
- внутренней нормы доходности;
- срока окупаемости;
- совокупной стоимости владения (Total Cost of Ownership, TCO);
- возврата на инвестиции (Return On Investment, ROI).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной единицей при моделировании был выбран сам дистанционный курс. Динамика развития центра и затраты ОАО «РЖД» напрямую зависят от количества курсов, стоимости обучения по курсу, себестоимости разработки курса, количества обучающихся на курсе, необходимого числа преподавателей и размера оплаты их труда и т. д.

Модель предусматривает получение центром определенной прибыли. До возврата инвестиций размер прибыли принят максимально возможным (10 % от стоимости обучения), однако при достижении срока окупаемости размер прибыли сокращается и рассчитывается исходя из параметра «величина желаемой прибыли». Модель также предполагает развитие ДЦДО ПГУПС, то есть создание новых дистанционных курсов. На настоящий момент в статье затрат, предусмотренных для филиалов ОАО «РЖД», нельзя выделить статью, по которой возможно финансирование разработки дистанционных учебных курсов. Для того чтобы данный проект мог развиваться, в модель заложено постоянное наращивание курсов, используемых в учебном процессе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимова, О. В. Оценка эффективности системы дистанционного обучения пользователей в ОАО «РЖД» / О. В. Ефимова, Е. Б. Бабошин // Экономика железных дорог. 2004. № 10. С. 52–58.

2. Обоснование эффективности дистанционной доподготовки персонала железнодорожного транспорта / О. Н. Куранова, А. И. Дергачев, Я. С. Ватулин, Н. А. Лебедева // Системы автоматизированного проектирования на транспорте: Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, Россия, 17–19 апреля 2017 г.). — Санкт-Петербург: ПГУПС, 2017. — С. 119–124.

3. Управление и информационные технологии на железнодорожном транспорте: Учебник для вузов железнодорожного транспорта / Л. П. Тулупов, Э. К. Лецкий, И. Н. Шапкин, А. И. Самохвалов; УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте; под. ред. Л. П. Тулупова. — Москва: Маршрут, 2005. — 467 с.

4. Дергачёв, А. И. Современные информационные технологии в ПГУПС / А. И. Дергачёв, С. А. Дергачёв, А. М. Перепеченов // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке: Сборник трудов XII Санкт-Петербургского конгресса (Санкт-Петербург, Россия, 12–30 ноября 2018 г.) / под общ. ред. Т. С. Титовой. — Санкт-Петербург: ПГУПС, 2018. — С. 73–74.

5. Андреев, А. А. Методика оценки экономической эффективности дистанционного обучения с помощью компьютерных сетей // Основы применения информационных технологий в учебном процессе вузов: научно-методический сборник. — Москва: Военный университет, 1995. — С. 77–83.

6. Теория и практика дистанционного обучения в России: Монография / А. А. Андреев, Ж. Н. Зайцева, С. Л. Лобачев, [и др.]. — Москва: МЭСИ, 1999. — 510 с.

7. Андреев, А. А. Некоторые проблемы проектирования центра дистанционного обучения / А. А. Андреев, Н. Г. Краюшенко, В. Ю. Фокин // Применение новых технологий в образовании: Материалы VII Международной конференции (Троицк, Московская обл., Россия, 29 июня–02 июля 1996 г.). — Троицк: Московский областной общественный фонд новых технологий в образовании «Байтик», 1996. — С. 21–22.

8. Управление персоналом в организации. Кадровая политика. Мотивация. Структура: Учебное пособие для вузов / А. К. Саакян, Г. Г. Зайцев, Н. В. Лашманова, Н. В. Дягилева. — Санкт-Петербург: Питер, 2002. — 175 с. — (Учебное пособие).

# Substantiation of the Economic Efficiency of Distance Learning Based on the Road Training Center at the University

PhD O. N. Kuranova, PhD A. I. Dergachev, A. I. Kozhevnikov, O. V. Petrova, V. I. Nosonov  
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
Saint Petersburg, Russia  
olga\_kuranova@mail.ru, kai45@mail.ru, olga\_sivers@mail.ru, vinvin2352@gmail.com

**Abstract.** As practice shows, the largest volume of traffic falls on rail transport. At the same time, the specified volume of transportation can be completed within the established time frame only if there are appropriate railway transport capabilities, who are in turn determined not only by the level of development of the technical base and ways of organizing traffic, but also by the level of training of personnel directly responsible for its operation.

Thus, this makes it necessary to ensure a sufficient level of training of the management staff, specialists of various departments and services, as well as employees of various enterprises and divisions of Russian Railways JSC. The availability of trained personnel will make it possible to increase the efficiency of using the production capacities of railway transport to carry out various transportations in specified volumes and precisely on time to any destinations. At the same time, the system of training and advanced training of the above-mentioned railway transport personnel that has developed to date does not sufficiently meet the requirements.

In these conditions, one of the main tasks that needs to be solved by the management bodies in railway transport is the need to increase the level of training of personnel to perform various tasks.

The use of new information non-traditional technologies in distance learning for the training and retraining of personnel is quite promising and economically justified. The profitability index for different options is greater than one and can even be equal to 1,5 for one road.

The economic efficiency of distance learning is calculated according to three interdependent components: the number of trainees, the cost of a distance course, and the relative profitability for Russian Railways JSC.

**Keywords:** provision of the industry with professional human resources, development of the educational process, creation and development of targeted programs for securing employees at industry facilities, reduction of financial costs for additional training and retraining, economic efficiency of distance learning.

## REFERENCES

1. Efimova O. V., Baboshin E. B. Evaluation of the Effectiveness of the Distance Learning System for Users at Russian Railways JSC [Otsenka effektivnosti sistemy distantsionnogo obucheniya pol'zovateley v OAO «RZhD»], *Railway Economy [Ekonomika zheleznykh dorog]*, 2004, No. 10, Pp. 52–58.
2. Kuranova O. N., Dergachev A. I., Vatulin Ya. S., Lebedeva N. A. Justification of Efficiency of Remote Additional Training of the Personnel of Railway Transport [Obosnovanie effektivnosti distantsionnoy dopodgotovki personala zheleznodorozhnogo transporta], *Computer-Aided Design Systems in Transport: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists [Sistemy avtomatizirovannogo proektirova-*

*niya na transporte: Sbornik trudov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh]*, Saint Petersburg, Russia, April 17–19, 2017. St. Petersburg, PSTU, 2017, Pp. 119–124.

3. Tulupov L. P., Letsky E. K., Shapkin I. N., Samokhvalov A. I. Management and information technologies in railway transport: Textbook for universities of railway transport [Upravlenie i informatsionnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte: Uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta]. Moscow, Marshrut Publishing House, 2005, 467 p.

4. Dergachev A. I., Dergachev S. A., Perepechenov A. M. Modern Information Technologies in PGUPS [Sovremennye informatsionnye tekhnologii v PGUPS], *Professional Education, Science and Innovation in the XXI Century: Proceedings of the XII St. Petersburg Congress [Professionalnoe obrazovanie, nauka i innovatsii v XXI veke: Sbornik trudov XII Sankt-Peterburgskogo kongressa]*, Saint Petersburg, Russia, November 12–30, 2018. Saint Petersburg, PSTU, 2018, Pp. 73–74.

5. Андреев А. А. Methodology for Assessing the Economic Efficiency of Distance Learning Using Computer Networks [Metodika otsenki ekonomicheskoy effektivnosti distantsionnogo obucheniya s pomoshchyu kompyuternykh setey], *Fundamentals of the Use of Information Technologies in the Educational Process of Universities [Osnovy primeneniya informatsionnykh tekhnologiy v uchebnom protsesse vuzov]*. Moscow, Military University, 1995, Pp. 77–83.

6. Andreev A. A., Zaytseva Zh. N., Lobachev S. L., et al. Theory and practice of distance learning in Russia: Monograph [Teoriya i praktika distantsionnogo obucheniya v Rossii: Monografiya]. Moscow, Moscow State University of Economics, Statistics and Informatics, 1999. — 510 c.

7. Andreev A. A., Krayushenko N. G., Fokin V. Yu. Some Problems of Designing a Distance Learning Center [Nekotorye problemy proektirovaniya tsentra distantsionnogo obucheniya], *Application of New Technologies in Education: Proceedings of the VII International Conference [Primenenie novykh tekhnologiy v obrazovanii: Materialy VII Mezhdunarodnoy konferentsii]*, Troitsk, Moscow region, Russia, June 29–July 2, 1996. Troitsk, Moscow Regional Public Foundation of New Technologies in Education «Bytic», 1996, Pp. 21–22.

8. Saakyan A. K., Zaytsev G. G., Lashmanova N. V., Dyagileva N. V. Human resource management in the organization. Personnel policy. Motivation. Structure: Study guide for universities [Upravlenie personalom v organizatsii. Kadrovaya politika. Motivatsiya. Struktura: Uchebnik dlya vuzov]. Saint Petersburg, Piter Publishing House, 2002, 175 p.

Russian version of the article © V. A. Prourzin, O. V. Prourzin is published  
in *Intelligent Technologies in Transport*, 2022, No. 1 (29), Pp. 34–38.  
DOI: 10.24412/2413-2527-2022-129-34-38.

---

# Algorithms for Big Data Analysis of Reliability of Recoverable Multichannel Systems

PhD V. A. Prourzin

Institute for Problems in Mechanical Engineering  
of the Russian Academy of Sciences  
Saint Petersburg, Russia  
proursin@gmail.com

PhD O. V. Prourzin

Emperor Alexander I St. Petersburg  
State Transport University  
Saint Petersburg, Russia  
pvo777@yandex.ru

**Abstract.** Computer systems for monitoring the technical condition of transport accumulate, among other things, large data on the reliability of individual devices and elements. This allows us to calculate system reliability metrics without resorting to costly testing. Methods for analyzing big data of reliability of recoverable multichannel systems are considered here. Big data contains values of mean time between failures and values of the recovery time of system elements obtained by monitoring the functioning of similar systems during operation. The distribution laws of failures and restorations of system elements are unknown and can be arbitrary. Algorithms for assessing the reliability indicators of recoverable systems are considered, taking into account the diversity, unreliability and variability of data. In the case of monotonic systems with independent recovery of elements, the estimation of the availability factor and the mean time between failures of the system is reduced to evaluating the mean time to failure and the mean time to recover each element of the system for arbitrary distribution laws.

**Keywords:** computer monitoring, big data, multichannel system, robustness, availability factor, mean time between failures, mean time to recovery.

## INTRODUCTION

Complex systems, from the point of view of the theory of reliability, are a set of technical devices interacting during operation and interconnected. A large number of scientific publications are devoted to mathematical models of reliability of complex, multichannel, cluster systems (see, for example, [1–7]).

An important issue is the assessment of the reliability characteristics of a complex system as a whole: mean time between failures and the availability factor. There is a well-known logical-probabilistic approach [4, 6], based on the representation of system failures and restorations as random binary events. System failures and recoveries depend on a number of primary binary random events (failure and recovery of elements). To date, a sufficiently effective apparatus has been developed for solving problems of this kind. This requires information about the distribution laws of the operating time to failure and the recovery time of each element.

Traditionally, the assessment of the reliability indicators of elements is carried out as a result of tests, which are characterized by high cost and time-consuming. On the other hand, computer monitoring of the operation of existing technical objects makes it possible to collect a huge database of reliability indi-

cators, in particular, data on operating time to failure and recovery time. The approaches and methods of working with such huge databases constitute the content of computer technologies for working with big data [8]. The variety, validity, and volatility of big data are at the heart of big data analytics. The main problem of analyzing operational data of system reliability is, firstly, that the values are obtained at different loads and different laws of distributions of failures and restorations, and, secondly, in the presence of unreliable and abnormal data.

The purpose of this work is to develop computer methods for assessing the main indicators of the reliability of recoverable multichannel systems, namely, the availability factor, the mean time between failures and the mean time to recover the system. The indicators are estimated according to the data of computer monitoring of failures and restorations of operation of similar products. This takes into account a variety of real laws of distribution of failures and restorations of elements, a variety of operational loads and the presence of unreliable data.

## STATEMENT OF THE PROBLEM

A model of a system consisting of  $n$  nodes (elements) is considered. The nodes form a monotonous structural diagram of the system operability, for example, a circuit with a series-parallel connection. The failures and restorations of each node are independent and form an alternating restoration process with some distribution functions.

Let, as a result of monitoring the operation of the system itself or the analogs of the nodes under consideration, a set of data on the operating time to failure and the duration of the restoration of each element of the system is obtained. For the  $j$ -th element, the values of the operating time to failure  $t_{ji}$ ,  $j = 1, \dots, n$ ;  $i = 1, \dots, N_j$  and the values of the duration of repair  $s_{ji}$ ,  $j = 1, \dots, n$ ;  $i = 1, \dots, M_j$  are given. The laws of distributions of failures and restorations, as well as data on operational loads, are unknown.

Further, we will proceed from the fact that the operating conditions of the systems under consideration are regulated and, in general, they can be considered close. This allows us to assert that the data on the reliability of technical products obtained from various sources will, on average, be homogeneous in terms of operating conditions. Data associated with non-standard operating conditions and other abnormal data should be

identified and excluded during rejection when analyzing the entire sample.

The problem is to assess the system availability factor  $K$ , the mean time between failures  $T_C$  of the system, and the mean time to restore  $T_R$  the system.

METHODS FOR SOLVING THE PROBLEM

**Rejecting of anomalous data.** The main problem facing the big data scientist is cleaning and normalizing this data. In the case under consideration, this problem consists, first of all, in the rejection of samples generated by too small or too large loads.

Let us consider the problem of estimating the mean operating time to failure  $T$  of a certain element of the system based on a sample of values of its operating time to failure:  $\{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ . In the presence of unreliable data and «drift» of the distribution laws that generate the data, the estimate of the sample position parameter (mean value), produced using the arithmetic mean, is unstable. To solve this problem, anomalous data rejecting procedures and methods of robust estimation of the sample position parameter are used [9, 10].

The simplest classical algorithm for rejecting a sample value  $t$  that is suspicious of an outlier is called the *3-sigma rule*. A sample element  $t$  is considered anomalous if the following inequality is fulfilled:  $|t - \bar{t}| \leq 3s$ , where  $\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$  is the sample mean, and  $s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}$  is the standard deviation.

Comparatively new approaches to solving the problem of rejecting anomalous data are based on algorithms for exploratory analysis of Tukey's data, namely Tukey's boxplot and its modifications [10]. The lower  $t_L$  and  $t_U$  upper rejection thresholds in the Tukey boxplot are set as follows:

$$t_L = \max \left\{ t_{(1)}; LQ - \frac{3}{2}IQR \right\},$$

$$t_U = \min \left\{ t_{(N)}; UQ + \frac{3}{2}IQR \right\}.$$

Here  $t_{(1)}$  and  $t_{(N)}$  are the extreme ordinal statistics of the sample (the  $k$ -th ordinal statistic is the  $k$ -th order value in the initial sample sorted in ascending order),  $IQR = UQ - LQ$  is the sample interquartile latitude,  $LQ = t_{([N/4])}$ ,  $UQ = t_{([N-N/4])}$  are the sampled lower and upper quartiles. The rejection rule is: the value  $t$  is abnormal if  $t < t_L$  or  $t > t_U$ .

**Robust position parameter estimates.** In the statistical analysis of big data, robust estimation methods are used to ensure the stability of the position parameter estimate [10]. Robustness is a property of a statistical procedure to be resistant to uncontrolled deviations from the accepted data distribution models.

The *two-stage robust estimation* procedure is as follows. At the first stage, outliers are rejected using the three sigma rule or Tukey's boxplot. At the second stage, the position parameter is estimated by calculating the sample mean for the remaining sample elements.

There are known methods for estimating the position parameter that are resistant to the presence of *outliers-robust methods* of mathematical statistics. The simplest known robust position parameter estimate is the sample median:

$$\hat{T} = \text{med}\{t_i\} = \begin{cases} t_{(k)}, & N = 2k + 1; \\ \frac{t_{(k)} + t_{(k+1)}}{2}, & N = 2k. \end{cases} \quad (1)$$

A well-known approach to constructing robust estimates was proposed by Huber, which is based on the minimax principle of constructing the best solution in the worst situation. Estimation of the position parameter according to Huber:

$$\hat{T} = \frac{1}{N} \left( (n_2 - n_1)k + \sum_{|t_i - \hat{T}| \leq k} t_i \right), \quad (2)$$

where  $k$  is the value that is allowed as a deviation from the center of the population (for example, we can take  $k = 1.5s$ );  $n_1$  is the number of observations from the sample lying in the interval  $(\infty, \hat{T} - k)$ ;  $n_2$  is the number of observations lying in the interval  $(\hat{T} + k, \infty)$ .

When calculating according to formula (2), the usual arithmetic mean or median (1) can be used as an initial estimate  $\hat{T}$ . Then, at each iteration, the sample is divided into three parts and calculated using formula (2) until the procedure converges.

Using the described methods gives us stable unbiased estimates of the mean time  $T_j$  to failure of the  $j$ -th element of the system. Estimates of the average recovery time  $S_j$  of the  $j$ -th element of the system are obtained in a similar way. Based on these values, an estimate of the availability factor of the  $j$ -th element is constructed, which does not depend on the type of the laws of distribution of failures and restorations [6]:

$$K_j = \frac{T_j}{T_j + S_j}. \quad (3)$$

**Logical structural function of the system performance.**

When analyzing the reliability of complex systems, it is convenient to use the structural diagrams of the system operability [4, 6, 7]. For example, if a system failure occurs when at least one element fails, then such a scheme will be a circuit of sequential connection of elements. If the system is operational when at least one element is operational, then we have a case of parallel connection of elements (loaded reserve circuit). We can also consider more complex circuits, including serial and parallel subsystems, a bridge connection (Figure 1).

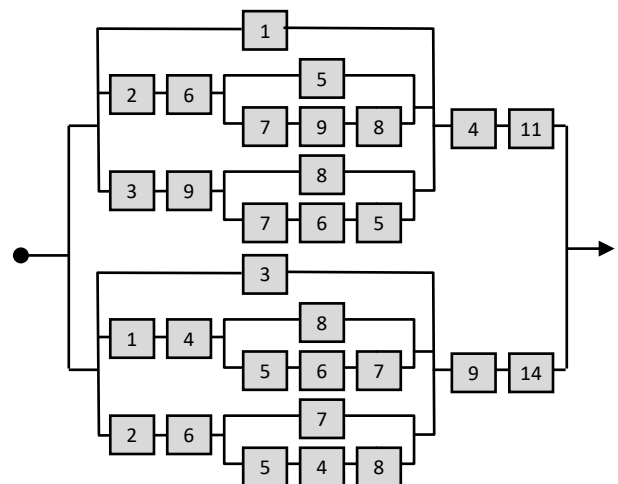


Fig. 1. An example of a structural diagram of the operability of a monotonic system

A system failure is a random event described by a binary (boolean) variable  $X$ , which takes one of two values: 0 (failure) or 1 (operation). This event depends on  $n$  simple independent events described by binary variables  $x_j$  (operation or failure of  $i$ -th element). A logical structural function of the system performance is introduced, which specifies the dependence of the state of the system  $X$  on the states of its elements:

$$X = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

For example, for a circuit of  $n$  series-connected elements (Figure 2), the structure function is the product of all binary variables:  $X = x_1 x_2 \dots x_n$ .

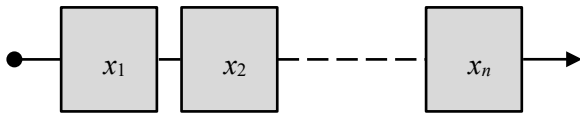


Fig. 2. A structural diagram of the operability of  $n$  series-connected elements

For a circuit of  $n$  parallel-connected elements (Figure 3), the structure function is

$$X = 1 - (1 - x_1)(1 - x_2) \dots (1 - x_n).$$

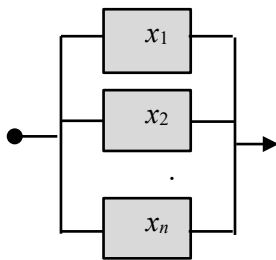


Fig. 3. A structural diagram of the operability of  $n$  parallel-connected elements

In what follows, only systems whose structural functions have the monotonicity property are considered [7].

The following important results are known [7] for monotonic systems with independent failures and restorations of elements. Let for each element of the system the mean values of time to failure  $T_j$ , mean values of the recovery time  $S_j$  and the corresponding values of the availability factor  $K_j$  are known. Then:

1. The availability factor  $K$  of a monotonic system is equal to the value of the structural function of the availability factors of the system elements

$$K = \varphi(K_1, K_2, \dots, K_n). \quad (4)$$

2. Mean time between failures  $T_C$  of a system with individual independent recovery of elements is calculated by the formula

$$T_C = \frac{K}{\lambda_C} = \frac{1}{\lambda_C} \varphi(K_1, K_2, \dots, K_n), \quad (5)$$

where  $\lambda_C$  is the reduced rate of system failures:

$$\lambda_C = \sum_{j=1}^n \frac{1}{T_j + S_j} (\varphi|_{K_j=1} - \varphi|_{K_j=0}).$$

3. The average system recovery time is determined by the following expression:

$$T_R = T_C \frac{1 - K}{K} = T_C \frac{1 - \varphi(K_1, K_2, \dots, K_n)}{\varphi(K_1, K_2, \dots, K_n)}. \quad (6)$$

All the above expressions do not depend on the form of the laws of distribution of failures and restorations of elements.

**Example.** Let a cluster computing system consist of three identical computers working in parallel,  $n = 3$ . The structural function of the system is as follows:

$$\varphi(x_1, x_2, x_3) = 1 - (1 - x_1)(1 - x_2)(1 - x_3).$$

Let the mean time to failure of one computer be equal to a year:  $T_0 = 8\,760$  hours, the mean recovery time after failure is equal to a calendar month:  $S_0 = 720$  hours.

Using formulas (3)–(5), we obtain the following. Availability factor of each computer is

$$K_0 = \frac{8\,760}{8\,760 + 720} = 0.9240506329.$$

The system availability factor is

$$K = 1 - (1 - K_0)^3 = 0.9995619008.$$

Reduced rate of system failures:

$$\lambda_C = \frac{3}{T_0 + S_0} (1 - (1 - (1 - K_0)^2)) = 1.8254 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}.$$

Average system time between failures

$$T_C = K / \lambda_C = 547\,581 \text{ h}.$$

Average system recovery time  $T_R = 240 \text{ h}$ .

#### ALGORITHM FOR SOLVING THE PROBLEM

1. Determination of the composition of the elements included in the system, construction of the operability diagram and the logical structural function of the system operability.

2. Extraction of operating time values and recovery times of these elements from the big data of monitoring system elements. Drawing up initial samples  $\{t_{ji}\}$  and  $\{s_{ji}\}$ .

3. Obtaining robust estimates of the position parameters for each sample: mean time to failure  $T_j$  and mean recovery time  $S_j$ . For this, either a two-stage estimation procedure or robust methods (1), (2) are used.

4. Calculation of the availability factor  $K_j$  of each element according to the formula (3).

5. Calculation of the system availability factor  $K$  according to the formula (4).

6. Calculation of the mean time between failures  $T_C$  of the system according to the formula (5).

7. Calculation of the average recovery time  $T_R$  of the system according to the formula (6).

#### CONCLUSION

Computer methods for monitoring the technical state of complex systems provide us with data on the reliability of these systems during operation. This data is a huge amount of information. The analysis and processing of such volumes of information make up the content of big data science. Here, methods for assessing the main indicators of the reliability of recoverable systems are considered under the conditions of a variety of real

laws of distribution of failures and restorations of elements, a variety of operational loads and the presence of unreliable data. Algorithms for assessing the availability factor, mean operating time between failures and mean time to restore the system based on real data from the operation of system elements are presented. It is shown that in this case it is not required to evaluate the laws of distribution of failures and restorations of elements.

#### REFERENCES

1. Shooman M. L. Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis, and Design. New York, John Wiley & Sons, 2002, 552 p.
2. Cherkesov G. N. Nadezhnost apparatno-programmnykh kompleksov: Uchebnoe posobie [Reliability of hardware and software systems: Study guide]. Saint Petersburg, Piter Publishing House, 2005, 479 p. (In Russian)
3. Gurov S. V. Analiz nadezhnosti tekhnicheskikh sistem s proizvolnymi zakonami raspredeleniy otkazov i vosstanovleniy [Analysis of The Reliability of Technical Systems with Arbitrary Laws of Distribution of Failures and Restorations], *Kachestvo i nadezhnost izdeliy: sbornik statey [Quality and Reliability of Products: Collection of Articles]*, 1992. No. 2 (18), Pp. 3–37. (In Russian)
4. Prourzin V. A. Techno-Economic Risk in Designing Complex Systems: Algorithms for Analysis and Optimization, *Automation and Remote Control*, 2003, Vol. 64, No. 7, Pp. 1054–1062. DOI: 10.1023/A:1024773916089.
5. Prourzin V. A. The Dynamic Reliability Model under Variable Loads and Accelerated Tests, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2020, Vol. 49, No. 5, Pp. 395–400. DOI: 10.3103/S1052618820050118.
6. Ryabinin I. A., Cherkesov G. N. Logiko-veroyatnostnye metody issledovaniya nadezhnosti strukturno-slozhnykh sistem [Logical-probabilistic methods for studying the reliability of structurally complex systems]. Moscow, Radio and Communications Publishers, 1981, 264 p. (In Russian)
7. Beichelt F., Franken P. Nadezhnost i tekhnicheskoe obsluzhivanie. Matematicheskiy podkhod [Reliability and maintenance. Mathematical approach]. Moscow, Radio and Communications Publishers, 1988, 392 p. (In Russian)
8. Leskovec J., Rajaraman A., Ullman J. D. Analiz bolshikh naborov dannykh [Mining of Massive Datasets]. Moscow, DMK Press, 2016, 498 p. (In Russian)
9. Barnett V., Lewis T. Outliers in Statistical Data. Third Edition. Chichester, John Wiley & Sons, 1994, 601 p.
10. Shevlyakov G. L., Vilchevski N. O. Robustness in Data Analysis: Criteria and Methods. Utrecht, VSP Publishers, 2002, 318 p.



Русскоязычная версия статьи © В. А. Проурзин, О. В. Проурзин опубликована в журнале «Интеллектуальные технологии на транспорте». 2022. № 1 (29). С. 34–38.  
DOI: 10.24412/2413-2527-2022-129-34-38.

# Алгоритмы анализа больших данных надежности восстанавливаемых многоканальных систем

к.ф.-м.н. В. А. Проурзин  
Институт проблем машиноведения  
Российской академии наук  
Санкт-Петербург, Россия  
poursin@gmail.com

к.т.н. О. В. Проурзин  
Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I  
Санкт-Петербург, Россия  
pvo777@yandex.ru

**Аннотация.** Компьютерные системы мониторинга технического состояния транспортных систем накапливают в том числе и большие данные по надежности отдельных устройств и элементов. Это позволяет вычислить показатели надежности систем, не прибегая к дорогостоящим испытаниям. Здесь рассмотрены методы анализа больших данных надежности восстанавливаемых многоканальных систем. Большие данные содержат значения наработки до отказа и значения времени восстановления элементов системы, полученных при мониторинге функционирования аналогичных систем в процессе эксплуатации. Законы распределения отказов и восстановлений элементов системы неизвестны и могут носить произвольный характер. Рассмотрены алгоритмы оценки показателей надежности восстанавливаемых систем с учетом разнообразия, недостоверности и изменчивости данных. В случае монотонных систем с независимым восстановлением элементов оценка коэффициента готовности и средней наработки между отказами системы сводится к оценке средней наработки до отказа и среднего времени восстановления каждого элемента системы для произвольных законов распределений.

**Ключевые слова:** компьютерный мониторинг, большие данные, сложная система, робастность, коэффициент готовности, средняя наработка между отказами, среднее время восстановления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Shooman, M. L. Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis, and Design. — New York: John Wiley & Sons, 2002. — 552 p.
2. Черкесов, Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов: Учебное пособие. — Санкт-Петербург: Питер, 2005. — 479 с.
3. Гуров, С. В. Анализ надежности технических систем с произвольными законами распределений отказов и восстановлений // Качество и надежность изделий: сборник статей. 1992. № 2 (18). С. 3–37. — (В помощь слушателям лекций Консультационного центра по качеству и надежности).

4. Prouzin, V. A. Techno-Economic Risk in Designing Complex Systems: Algorithms for Analysis and Optimization // Automation and Remote Control. 2003. Vol. 64, No. 7. Pp. 1054–1062. DOI: 10.1023/A:1024773916089.

5. Prouzin, V. A. The Dynamic Reliability Model under Variable Loads and Accelerated Tests // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Vol. 49, No. 5. Pp. 395–400. DOI: 10.3103/S1052618820050118.

6. Рябинин, И. А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем / И. А. Рябинин, Г. Н. Черкесов. — Москва: Радио и связь. Редакция литературы по радиоэлектронике, 1981. — 264 с. — (Библиотека инженера по надежности).

7. Байхельт, Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход = Zuverlässigkeit und Instandhaltung. Mathematische Methoden / Ф. Байхельт, П. Франкен; перевод с нем. М. Г. Коновалова; под ред. И. А. Ушакова. — Москва: Радио и связь. Редакция переводной литературы, 1988. — 392 с.

8. Лесковец, Ю. Анализ больших наборов данных = Mining of Massive Datasets / Ю. Лесковец, А. Раджараман, Д. Д. Ульман; перевод с англ. А. А. Слинкина. — Москва: ДМК Пресс, 2016. — 498 p.

9. Barnett, V. Outliers in Statistical Data. Third Edition / V. Barnett, T. Lewis. — Chichester: John Wiley & Sons, 1994. — 601 p.

10. Shevlyakov, G. L. Robustness in Data Analysis: Criteria and Methods / G. L. Shevlyakov, N. O. Vilchevski. — Utrecht: VSP Publishers, 2002. — 318 p. — (Modern Probability and Statistics).

# A Module of Educational Program for Distance Learning

Grand PhD V. N. Fomenko, PhD V. V. Garbaruk  
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
Saint Petersburg, Russia  
vfomenko1943@gmail.com, vvgarbaruk@mail.ru

**Abstract.** A training program on two sections of linear algebra is proposed for educational purposes. The student, using basic operations, should transform the given matrix into the identity one. Mastering this skill makes it possible to solve systems of linear algebraic equations by the Gauss method and find the inverse matrix. An important feature of the suggested software segment is that it provides the ability to monitor the process of solving the problem by a student, for whom there are always several possible approaches. The program can be used in distance technologies in computer training.

**Keywords:** methodology of teaching, training programs, linear algebraic equations, inversed matrix.

## INTRODUCTION

Educational programs at universities are aimed at students who independently acquire skills to solve problems of a particular subject. In such a program, at the pace chosen by the student, the training material is presented in a convenient and understandable form. Monitoring of acquired skills provides feedback in training programs. Not all branches of mathematics have algorithms that allow you to create programs that meet the learning objectives [1–5]. It is difficult to create a training program in which a student, solving a problem, chooses a sequence of actions. A similar program was created, for example, to study the operations of vector algebra [6]. The proposed software product is characterized by the ability to monitor the process of solving the problem by the student, who always has several possible approaches. A large number of programs (Excel, Mathcad, MATLAB and others) can solve problems, but they do not explain how the result is obtained [7, 8]. The program consists of two modules: «solving a system of linear algebraic equations» and «finding the inverse matrix», united by a single methodological approach. The modules of the training program are written in Fortran 95 [9].

## FEATURES OF PROGRAM MODULES

In the learning process, the student can apply for various kinds of information, necessary both for the correct sequence of operations and for answers to the questions offered by the program. These include a quick reference (F1 key), a text with a detailed description of the methods, five presentations with explanations of the sequence of actions when solving examples, a set of tasks consisting of four systems of equations (defined, indefinite, incompatible, homogeneous) and one third-order matrix. This set of tasks makes it possible to use software package to verify learning outcomes. An important element of training is the student's independent choice of the trajectory of achieving the goal. If the student is having difficulty solving the problem, then he can see in step-by-step mode a detailed solution to a similar example.

After solving the problem, a digital code is displayed on the screen. It is calculated by the program according to a certain algorithm known to the teacher based on the parameters of the problem. This code is a hash code of the problem description. The student can get this code either from the program, having solved the problem correctly, or guessing it, which is extremely unlikely.

The program has the following features:

- at any time, you can turn to theoretical material;
- the «Go back», «Go on» keys enable the student to both view all the steps of the solution and cancel unsuccessful operations;
- when solving an example, the mistakes made by student are recorded and their nature is determined. As a result, a list is composed and then communicated to the student before the program is closed.

## CALCULATING THE INVERSE MATRIX

Let us consider in detail the operation of the module «calculating the inverse matrix». After specifying the dimension of the matrix to be unversed, its elements are entered in my order in the table that appears. You can enter both decimal and common fractions. Pressing the «Complete Entry» button takes the student to the next page. If a degenerate matrix is entered, the message «A singular matrix! Enter a valid matrix». Usually, in the classroom, a third-order matrix is selected, for example:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

After specifying the dimension of the matrix, its elements are entered into the table.

Step No. 1

Matrix to be inverted

0	1	1
2	1	0
3	0	-1

Inversed matrix is to appear here

1	0	0
0	1	0
0	0	0

MATRIX TRANSFORMATION

Swap rows

Single row linear transformation

Two rows linear transformation

Select two rows and press «Continue»

Fig. 1. An invertible matrix

On the screen, the student sees an invertible matrix, an identity matrix of the same dimension, and a menu «MATRIX TRANSFORMATION» that consists of three items (Figure 1):

- swap rows;
- single row linear transformation;
- two rows linear transformation.

The proposed operations are performed on two matrices identically. The student, choosing and performing various steps of the menu, should receive an identity matrix instead of the inverse. In this case, the second matrix becomes inverse [10, 11].

Possible initial steps to achieve the desired result are provided below. In the matrix shown in Figure 1, to get a non-zero element in the upper-left corner, you can select «Swap rows» item and highlight with the mouse, for example, two rows.

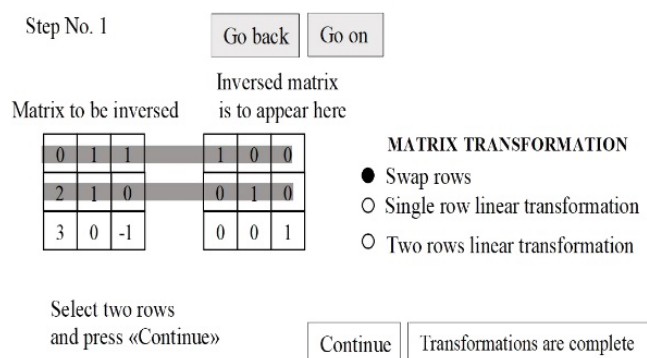


Fig. 2. Swap rows

In the matrix shown in Figure 1, to get a non-zero element in the upper-left corner, you can select «Swap rows» item and highlight with the mouse, for example, two rows (Figure 2). The result can be seen in Figure 3 after selecting «Continue».

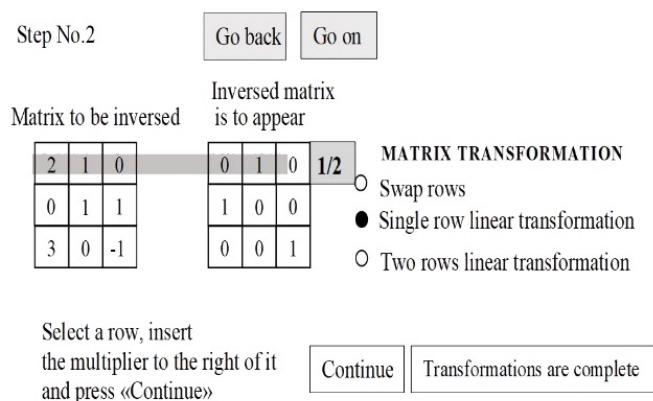
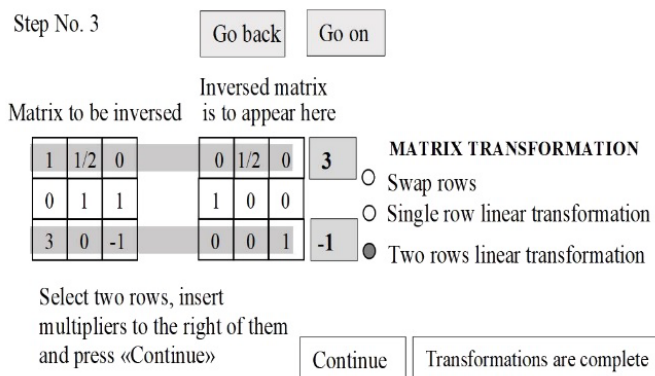


Fig. 3. Single row linear transformation

To get «1» in the upper left corner, the student selects the item «Single row linear transformation», mark the first line and enter the required coefficient «1/2» (Figure 3). Figure 4 shows the result of this operation.

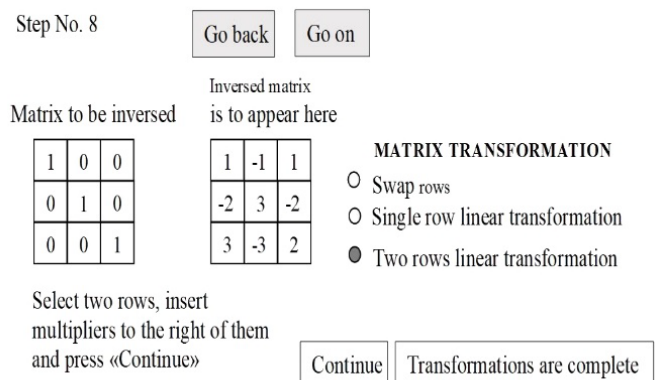
To get zero in the matrix, the last item «Two row linear transformation» is selected. First, the student selects the row of the matrix that needs to be changed, it becomes highlighted in red. Then indicates the line with which the change will be implemented. To complete the operation, the student enters the



The red row of the two selected ones is changed

Fig. 4. Two rows linear transformation

coefficients by which the selected rows will be multiplied (Figure 4). Instead of the first selected line, the sum of the two marked lines multiplied by the given coefficients appears. Figure 5 shows the final view of the matrices after several steps.



The red row of the two selected ones is changed

Fig. 5. Transformations completed

The key «Transformations completed» is used if the student believes that he has completed all the necessary actions (Figure 5). If the left matrix is different from the identity matrix, then the inscription appears: «Transformations are not finished yet», and the unsuccessful action will be included in the list of errors. At the end of the work, the message may appear: «You have not made a single mistake», or a list of errors indicating their type and quantity.

During the learning, one should limit oneself to the dimension of the matrix 6×6 (although the maximum allowable size is 20×20), because in this case, the transformed initial matrix, the obtained inverse matrix, and all menu items (Figure 4) are visible simultaneously on the 15-inch monitor screen.

#### SOLVING A SYSTEM OF LINEAR ALGEBRAIC EQUATIONS

The module «solving a system of linear algebraic equations» has a more diverse menu (Figure 5). Three operations are added: «Swap columns», «Remove zero row», «Remove proportional row».

$$\begin{cases} 2x_1 + 4x_3 = 6; \\ x_2 + x_3 = 2; \\ 2x_2 + 2x_3 = 4; \\ 3x_1 + 6x_3 = 9. \end{cases}$$

The extended matrix shown in Figure 6 corresponds to this system.

Step No. 1

Go back Go on

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$b$
2	0	4	6
0	1	1	2
0	2	2	4
3	0	6	9

MATRIX TRANSFORMATION

Swap rows  
 Single row linear transformation  
 Remove zero row

Swap columns  
 Two rows linear transformation  
 Remove proportional row

Analysis of solution

Inconsistent system  
 Definite system  
 Indefinite system

Select two rows, insert multipliers to the right of them and press «Continue»

The red row of the two selected ones is changed

Continue

Fig. 6. The extended matrix

In this module there is another final step of the solution. After the transformation of the system matrix, the student must specify the type of system in the «Analysis of solution» menu:

- definite system;
- indefinite system;
- indefinite system.

If the student makes the right choice, he needs to type the answer. The problem, for example, is considered solved if the first rows and columns in the matrix of the system form the identity matrix [10, 12].

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & b \\ 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 4 \end{pmatrix}$$

In this case the student selects the «Definite system» item. Then you need to type the answer received in the last column.

Step No. 1

Go back Go on

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$b$
2	0	4	6
0	1	1	2
0	2	2	4
3	0	6	9

MATRIX TRANSFORMATION

Swap rows  
 Single row linear transformation  
 Remove zero row

Swap columns  
 Two rows linear transformation  
 Remove proportional row

Analysis of solution

Inconsistent system  
 Definite system  
 Indefinite system

Select two rows, insert multipliers to the right of them and press «Continue»

The red row of the two selected ones is changed

Continue

Fig. 7. Two rows linear transformation

The zero line obtained after the operation shown in Figure 7 is obligatorily deleted.

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & b \\ 2 & 0 & 4 & 6 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 2 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & b \\ 1 & 0 & 4 & 6 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 2 & 4 \end{pmatrix}$$

This action can be accelerated by selecting the menu item «Remove proportional row». After selecting two proportional rows, the indicated row is deleted first:

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & b \\ 2 & 0 & 4 & 6 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 2 & 4 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & b \\ 2 & 0 & 4 & 6 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

Select the item «Single row linear transformation», the student marks the first line and enters the required coefficient «1/2».

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & b \\ 2 & 0 & 4 & 6 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & b \\ 1 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

In this case, in the «Analysis of solution» menu, select the «Indefinite system» item. Then the student must type the answer:

$$\begin{cases} x_1 = 3 - 2x_3; \\ x_2 = 2 - x_3, \end{cases}$$

specifying first the additional basis variables (for instance,  $x_1$  and  $x_2$ ) in the given example.

In the case of obtaining a matrix of the form

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & b \\ 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \end{pmatrix}$$

It is necessary to select the «Swap rows» item in the «Matrix Transformation» menu (Figure 6). By selecting the second and third columns, the student receives a matrix

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_3 & x_2 & b \\ 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 3 \end{pmatrix}$$

In the «Analysis of solution» menu, student selects the «Indefinite system» item. Then he must type the answer

$$\begin{cases} x_1 = 2; \\ x_3 = 3, \end{cases}$$

specifying basis variables  $x_1$  and  $x_3$ .

For an incompatible system

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & b \\ 1 & 0 & 5 & 2 \\ 0 & 1 & 6 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}$$

it is necessary to specify the decisive row, for example, the third row in the example above.

#### CONCLUSIONS

The sudden transition of universities around the world from traditional forms of education to individual self-training has required a change in the teaching methods of all disciplines, including mathematics. The success of technologies for remote learning depends on the correct methodological approach within software. A student cannot effectively comprehend new information if the educational material comes only in the form of texts [13, 14]. In the proposed learning program, the student has a starting position — the initial matrix, and the finishing position — the identity matrix. In each module the student is invited to think through a sequence of actions and implement

them, having access to texts and presentations in case of difficulties. When the pandemic ends and universities return to traditional in-person education, such distance learning will continue to be in demand [15, 16]. This program can be used on a local computer, in a classroom, or via the Internet in online mode.

#### REFERENCES

1. Ochkov V. F., Bogomolova E. P. Teaching Mathematics with Mathematical Software, *Journal of Humanistic Mathematics*, 2015, Vol. 5, Is. 1, Pp. 265–285. DOI: 10.5642/jhummath.201501.15.
2. Tchounikine, P. Computer Science and Educational Software Design: A Resource for Multidisciplinary Work in Technology Enhanced Learning. Heidelberg, Springer-Verlag, 2011, 193 p. DOI: 10.1007/978-3-642-20003-8.
3. Zhuleva L. D. Ispolzovanie obuchayushchikh programm po vysshey matematike v uchebnom protsesse inostrannykh studentov [The Use of Educational Computer Programs in the Field of Higher Mathematics in the Educational Process of Foreign Students], *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii. Seriya «Mezhdunarodnaya deyatelnost vuzov» [Civil Aviation High Technologies]*, 2007, No. 116, Pp. 102–107. (In Russian)
4. Zhukovskaya T. V., Molokanova E. A. Povyshenie effektivnosti protsessa obucheniya matematike na osnove spetsialnogo programmnogo obucheniya [Rise of Effectiveness of Mathematics Teaching Process on the Base of Special Software Use], *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Gumanitarnye nauki [Tambov University Review. Series: Humanities]*, 2010, No. 12 (92), Pp. 53–61. (In Russian)
5. Daynyak I. V., Dzerzhek K., Khuste T. Podkhod k postroeniyu interaktivnykh multimediynykh stranits dlya avtomatizirovannoy obuchayushchey sistemy [An Approach to Building Interactive Multimedia Pages for an Automated Learning System], *Dstantsionnoe obuchenie — obrazovatel'naya sreda XXI veka: Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii [Distance Learning — The Educational Environment of the XXI Century: Proceedings of the III International Scientific and Methodological Conference]*, Minsk, Belarus, November 13–15, 2003. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2003, Pp. 201–203. (In Russian)
6. Karpovich S. E., Baev V. S. Kompyuternaya programma dlya izucheniya operatsiy vektornoy algebry s vozmozhnostyu primeneniya v distantsionnom obuchenii [Computer Program for the Study of Vector Algebra Operations with the Possibility of Application in Distance Learning], *Informatizatsiya obucheniya matematike i informatike: pedagogicheskie aspekty: Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 85-letiyu Belorusskogo gosudarstvennogo Universiteta [Informatization of Teaching Mathematics and Informatics: Pedagogical Aspects: Proceedings of the International Scientific Conference in Honour of 85 Years Jubilee of Belarusian State University]*, Minsk, Belarus, October 25–28, 2006. Minsk, Belarusian State University, 2006, Pp. 176–180. (In Russian)
7. Walkenbach J. Excel 2016 Bible. Indianapolis (IN), John Wiley & Sons, 2015, 1152 p.
8. Gilat A., Subramaniam V. Numerical Methods for Engineers and Scientists: An Introduction with Applications Using MATLAB. Third Edition. John Wiley & Sons, 2013, 576 p.
9. Chapman S. J. Fortran 90/95 for Scientists and Engineers. McGraw-Hill Companies, 1998, 888 p.
10. Kvasov B. I. Chislennyye metody analiza i lineynoy algebry. Ispolzovanie Matlab i Scilab: Uchebnoe posobie [Numerical methods of analysis and linear algebra. Using Matlab and Scilab: Study guide]. Saint Petersburg, LAN Publishing House, 2016, 328 p. (In Russian)
11. Anton H., Rorres C., Kaul A. Elementary Linear Algebra: Applications Version. Twelfth Edition. John Wiley & Sons, 2019, 800 p.
12. Voevodin Val. V., Voevodin Vl. V. Entsiklopediya lineynoy algebry. Elektronnaya sistema LINEAL [Encyclopedia of linear algebra. LINEAL electronic system]. Saint Petersburg, BHV-Peterburg Publishing House, 2006, 544 p. (In Russian)
13. Bolshakov M. A., Molodkin I. A., Pugachev S. V. Comparative Analysis of Machine Learning Methods to Assess the Quality of IT Services, *Proceedings of the Workshop «Models and Methods for Researching Information Systems in Transport 2020» on the Basis of the Departments «Information and Computer Systems» and «Higher Mathematics» (MMRIST 2020)*, St. Petersburg, Russia, December 11–12, 2020. *CEUR Workshop Proceedings*, 2021, Vol. 2803, Pp. 142–149. DOI: 10.24412/1613-0073-2803-142-149.
14. Adadurov S. E., Fomenko Y. S., Khomonenko A. D., Krasnovidov A. V. Integration of the MATLAB System and the Object-Oriented Programming System C# Based on the Microsoft COM Interface for Solving Computational and Graphic Tasks, In: *Silhavy R. (ed.) Intelligent Algorithms in Software Engineering: Proceedings of the 9th Computer Science On-line Conference (CSOC 2020)*, Zlin, Czech Republic, July 15, 2020, Volume 1. Cham, Springer Nature, 2020, Pp. 581–589. (Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 1224). DOI: 10.1007/978-3-030-51965-0\_51.
15. Adnan M., Anwar K. Online Learning Amid the COVID-19 Pandemic: Student's Perspectives, *Journal of Pedagogical Sociology and Psychology*, 2020, Vol. 2, Is. 1, Pp. 45–51. DOI: 10.33902/JSPS.2020261309.
16. Toquero C. M. Challenges and Opportunities for Higher Education amid the COVID-19 Pandemic: The Philippine Context, *Pedagogical Research*, 2020, Vol. 5, Is. 4, Art. No. em0063, 5 p. DOI: 10.29333/pr/7947.

# Модуль образовательной программы для дистанционного обучения

д.ф.-м.н. В. Н. Фоменко, к.т.н. В. В. Гарбарук

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

Санкт-Петербург, Россия

vfomenko1943@gmail.com, vvgarbaruk@mail.ru

**Аннотация.** Предложена обучающая программа по двум разделам линейной алгебры. Студент, используя элементарные операции, должен преобразовать заданную матрицу в единичную. Освоение этого навыка дает возможность решать системы линейных алгебраических уравнений методом Гаусса и находить обратную матрицу. Важной особенностью предлагаемого программного обеспечения является то, что в нем отслеживается процесс решения задачи студентом, у которого всегда есть несколько возможных способов получения ответа. Программа может быть использована в дистанционных технологиях при компьютерном обучении.

**Ключевые слова:** методология обучения, обучающие программы, системы линейных алгебраических уравнений, обратная матрица.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ochkov, V. F. Teaching Mathematics with Mathematical Software / V. F. Ochkov, E. P. Bogomolova // Journal of Humanistic Mathematics. 2015. Vol. 5, Is. 1. Pp. 265–285. DOI: 10.5642/jhummath.201501.15.

2. Tchounikine, P. Computer Science and Educational Software Design: A Resource for Multidisciplinary Work in Technology Enhanced Learning. — Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. — 193 p. DOI: 10.1007/978-3-642-20003-8.

3. Жулёва, Л. Д. Использование обучающих программ по высшей математике в учебном процессе иностранных студентов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. Серия «Международная деятельность вузов». 2007. № 116. С. 102–107.

4. Жуковская, Т. В. Повышение эффективности процесса обучения математике на основе специального программного обучения / Т. В. Жуковская, Е. А. Молоканова // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки. 2010. № 12 (92). С. 53–61.

5. Дайняк, И. В. Подход к построению интерактивных мультимедийных страниц для автоматизированной обучающей системы / И. В. Дайняк, К. Дзержек, Т. Хустё // Дистанционное обучение — образовательная среда XXI века: Материалы III Международной научно-методической конференции (Минск, Беларусь, 13–15 ноября 2003 г.). — Минск: Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники, 2003. — С. 201–203.

6. Карпович, С. Е. Компьютерная программа для изучения операций векторной алгебры с возможностью применения в дистанционном обучении / С. Е. Карпович, В. С. Басв // Информатизация обучения математике и информатике: педагогические аспекты: Материалы международной научной конференции, посвященной 85-летию Белорусского государственного университета = Informatization of Teaching Mathematics and Informatics: Pedagogical Aspects: Proceedings of the

International Scientific Conference in Honour of 85 Years Jubilee of Belarusian State University (Минск, Беларусь, 25–28 октября 2006 г.). — Минск: Белорус. гос. ун-т, 2006. — С. 176–180.

7. Walkenbach, J. Excel 2016 Bible. — Indianapolis (IN): John Wiley & Sons, 2015. — 1152 p. — (Bible).

8. Gilat, A. Numerical Methods for Engineers and Scientists: An Introduction with Applications Using MATLAB. Third Edition / A. Gilat, V. Subramaniam. — John Wiley & Sons, 2013. — 576 p.

9. Chapman, S. J. Fortran 90/95 for Scientists and Engineers. — McGraw-Hill Companies, 1998. — 888 p.

10. Квасов, Б. И. Численные методы анализа и линейной алгебры. Использование Matlab и Scilab: Учебное пособие. — Санкт-Петербург: Лань, 2016. — 328 с. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

11. Anton, H. Elementary Linear Algebra: Applications Version. Twelfth Edition / H. Anton, C. Rorres, A. Kaul. — John Wiley & Sons, 2019. — 800 p.

12. Воеводин, В. В. Энциклопедия линейной алгебры. Электронная система ЛИНЕАЛ / Вал. В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2006. — 544 с.

13. Bolshakov, M. A. Comparative Analysis of Machine Learning Methods to Assess the Quality of IT Services / M. A. Bolshakov, I. A. Molodkin, S. V. Pugachev // Proceedings of the Workshop «Models and Methods for Researching Information Systems in Transport 2020» on the Basis of the Departments «Information and Computer Systems» and «Higher Mathematics» (MMRIST 2020) (St. Petersburg, Russia, 11–12 December 2020). CEUR Workshop Proceedings. 2021. Vol. 2803. Pp. 142–149. DOI: 10.24412/1613-0073-2803-142-149.

14. Integration of the MATLAB System and the Object-Oriented Programming System C# Based on the Microsoft COM Interface for Solving Computational and Graphic Tasks / S. E. Adadurov, Y. S. Fomenko, A. D. Khomonenko, A. V. Krasnovidov // Intelligent Algorithms in Software Engineering: Proceedings of the 9th Computer Science On-line Conference (CSOC 2020), (Zlin, Czech Republic, 15 July 2020). Volume 1 / R. Silhavy (ed.). — Cham: Springer Nature, 2020. — Pp. 581–589. — (Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 1224). DOI: 10.1007/978-3-030-51965-0\_51.

15. Adnan, M. Online Learning Amid the COVID-19 Pandemic: Student's Perspectives / M. Adnan, K. Anwar // Journal of Pedagogical Sociology and Psychology. 2020. Vol. 2, Is. 1. Pp. 45–51. DOI: 10.33902/JPSP.2020261309.

16. Toquero, C. M. Challenges and Opportunities for Higher Education amid the COVID-19 Pandemic: The Philippine Context // Pedagogical Research. 2020. Vol. 5, Is. 4. Art. No. em0063. 5 p. DOI: 10.29333/pr/7947.

Russian version of the article © V. A. Lokhvitsky, V. A. Goncharenko, E. S. Levchik is published  
in *Intelligent Technologies in Transport*, 2022, No. 1 (29), Pp. 39–44.  
DOI: 10.24412/2413-2527-2022-129-39-44.

# A Scalable Microservice Model Based on a Queuing System with «Cooling»

Grand PhD V. A. Lokhvitsky, PhD V. A. Goncharenko, E. S. Levchik

Mozhaisky Military Space Academy  
Saint Petersburg, Russia  
lokhev\_va@mail.ru, vlango@mail.ru

**Abstract.** The formalization of a scalable service functioning is proposed, taking into account the time spent on configuring computing nodes based on a multichannel non-exponential queuing system with «heating» and «cooling» of channels. The complexity of the model is reduced by representing the durations of «heating» and «cooling» in the form of a generalized random delay before servicing. The main stages of the method of calculating the probability-time characteristics of the QS with «cooling» are described. The markovization of the non-Markov components of the QS under consideration was carried out using the H<sub>2</sub>-distribution. The probability distribution of the states of the QS under consideration is obtained. The results obtained by the numerical method are compared with the results of simulation.

**Keywords:** microservice modelling, non-exponential queuing system, queuing system with «cooling», distribution approximation, numerical queuing theory.

## INTRODUCTION

Modern information systems are developed and operate using a wide range of technologies. Among them, as one of the most promising, it is necessary to single out a technology based on a micro-service architecture with container virtualization [1].

The infrastructure of a microservice information system with container virtualization is characterized by a dynamic change in the computing structure and node parameters. In particular, when considering the scaling processes of services implemented on the basis of containerized applications, it is necessary to take into account the time spent on launching the required number of containers, checking their operability, as well as stopping containers that are not currently expected to be used [2].

The general scheme of the application processing process by a scalable service is shown in Figure 1.

The durations of individual operations of starting, stopping containers, and checking the operability (taking into account the type of service application running in the container) are random variables that must be taken into account in the corresponding models.

## FORMALIZATION OF THE SCALABLE SERVICE FUNCTIONING

Traditionally, queue theory models are used to model the processes of processing a random flow of tasks. In particular, the task processing process we are considering can be represented as a multichannel queuing system with additional consideration of the time spent on configuring the service.

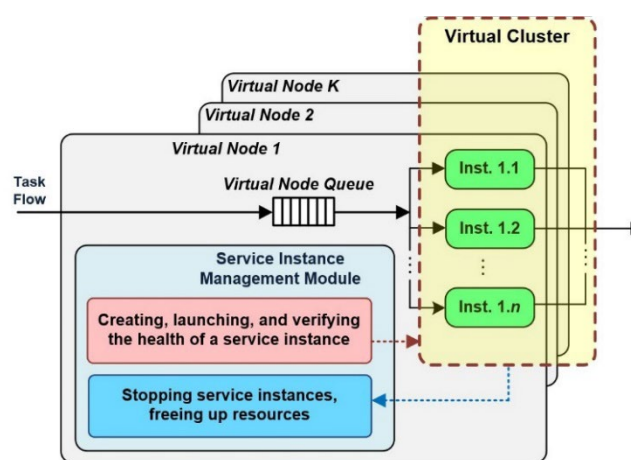


Fig. 1. The scheme of a scalable service functioning, taking into account the costs of allocating and releasing resources

The specified configuration can be performed in several cases:

- when starting the service (instances of the service), if at the time of arrival of the next service request, the service was stopped;
- when the number of running instances of the service changes (scaling up or down the number of instances).

Depending on the types of distributions that characterize the random processes of the arrival of applications into the system, their maintenance, scaling of the service with a health check, models based on different types of queuing system (QS) can be used. Analysis of the works [3–6] showed that modeling of such processes is possible based on the use of QS with «heating» or «cooling» of service channels. A significant limitation of these works is the impossibility of simultaneous accounting in one model of the processes of «heating» and «cooling» channels. The schematic diagram of the desired process is shown in Figure 2.

In the stationary mode of operation of the service system, the location on the time axis of the moment of occurrence of the specified delay (before or after maintenance) does not matter in principle. It is important to take into account the total random duration of the delay, which directly affects the time the application stays in the system. Here it is necessary to take into account the presence of random delays of both types, therefore it is possible to present the process under consideration using a

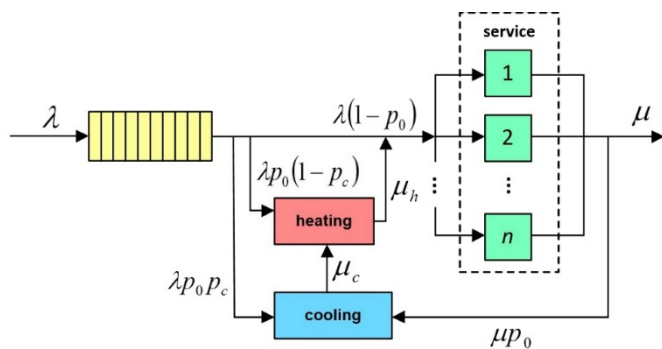


Fig. 2. Representation of the process in the form of a multichannel QS with «heating» and/or «cooling»

general-type multichannel QS model with «cooling», proposed in [6]. To do this, at the initial stage, it is necessary to find a generalized random delay before (or after) maintenance based on two distributions of random variables — the duration of «heating» and the duration of «cooling».

REPRESENTATION OF HEATING AND COOLING PROCESSES IN THE FORM OF A RANDOM DELAY BEFORE QUERIES SERVICING

To calculate the desired delay, first we will build a time diagram of the specified process (Figure 3).

When constructing the diagram, we define the following conditions:

1. The «warm-up» mode is initiated only by the event of receipt of an application in an empty system.

2. The «cooling» mode is initiated only by the event of the end of processing of the last application in the absence of applications in the queue.

3. The beginning of processing of an application entering an empty system is determined by the duration of the «warm-up» stage and the remainder of the «cooling» time, provided that the system was «cooling» at the moment.

The conditions listed above require clarification. Firstly, the «heating» mode is activated if the system was empty (there was not a single request for maintenance and in the queue) and the next request arrived. In this case, the service of the arrived application will begin after a random period of «heating» of the system. In addition, all applications arriving during the «heating» of the system fall into the queue and are also not discussed until the end of this period.

Secondly, the «cooling» mode is activated after the end of servicing the last application (that is, the maintenance of the next application has ended and there is not a single application in the queue). Applications arriving during the «cooling» of the system also fall into the queue, and their maintenance can begin no earlier than the «cooling» period ends, and then the «heating» mode.

Thus, the desired duration of the random delay before maintenance is found by convolving the first initial distribution with the residual second (for example, «heating» with the residual distribution of «cooling»).

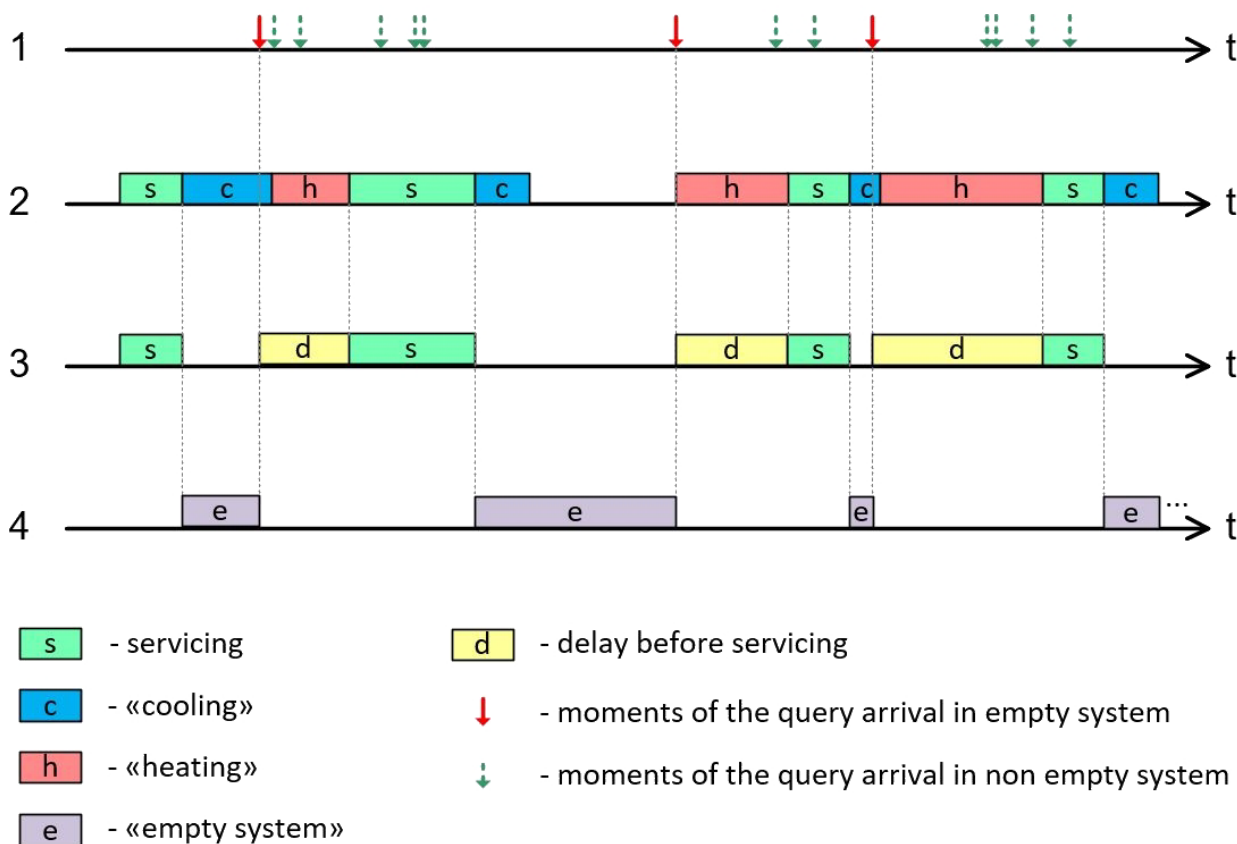


Fig. 3. Time diagram of QS operation with «heating» and «cooling» of service channels



Since the Laplace-Stieltjes transform (LST) of the convolution is equal to the product of the LST components [7], the desired distribution of the «delay» time before service in terms of LST is defined as

$$d(s) = h(s)f(s)$$

where  $h(s)$  — is the LST of the distribution of the duration of «heating»,  $f(s)$  — is the LST of the residual distribution of the duration of «cooling».

According to [7], the initial moments of the residual distribution based on the initial moments of the distribution of the duration of «cooling» can be found by the formula:

$$f_k = \frac{c_{k+1}}{(k+1)c_1}, k = 1, 2, \dots,$$

where  $k$  is the order of the initial moment of the distribution.

Further, the desired random delay before or after servicing can be found based on the convolution of distributions directly at the moments [7]. To do this, we will use symbolic decomposition

$$d_k = (h + f)^k,$$

in which, after the decomposition of the binomial, the exponents of the degree are translated into the indices of the corresponding moments. In particular, the first three initial moments are according to

$$d_1 = h_1 + f_1,$$

$$d_2 = h_2 + 2h_1f_1 + f_2,$$

$$d_3 = h_3 + 3h_2f_1 + 3h_1f_2 + f_3.$$

The found approximation of random durations makes it possible to reduce the complexity of modeling based on the use of the QS model only with «heating» or only with «cooling» of service channels instead of using models with simultaneous consideration of both the «heating» and «cooling» process.

MODEL DESCRIPTION

Let's consider a model of a multichannel QS with a «cooling» type  $M/M/n - H_2^c$ . Recall that the second-order hyperexponential distribution refers to phase-type distributions and assumes the choice of one of two alternative phases by a random process [8]. With probability  $y_1$ , the «cooling» process enters the first phase and a random time is delayed in it, distributed exponentially with the parameter  $\mu_1^c$ . With probability  $y_2 = 1 - y_1$ , the process enters the second phase, where the exponential delay has a parameter  $\mu_2^c$ . The diagram of transitions between the states of the Markov process describing the system is shown in Figure 4.

The leftmost column in the diagram shows the current number of applications in the system and indicates the number of the chart tier. On each tier, the system is in one of three states: maintenance and cooling of one of two types. The cooling condition characterizes some work that is performed by the system after the end of servicing the last application. In this model, the cooling duration of the system is characterized by a two-phase hyperexponential distribution. After servicing the last application, the system switches to the cooling mode (phase) of the 1st type with probability  $y_1$  and to the cooling mode of the 2nd type with probability  $y_2$ . Each of the cooling phases is characterized

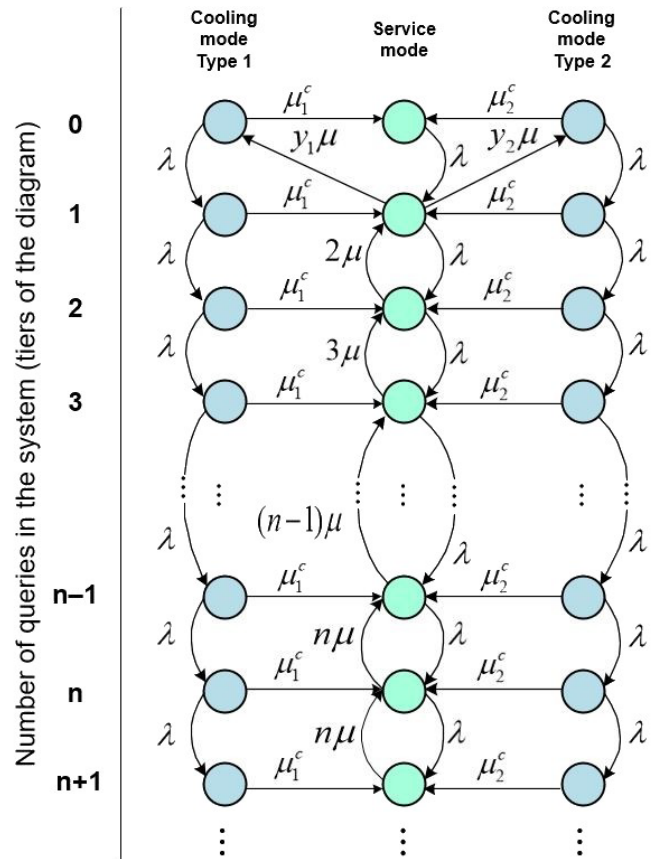


Fig. 4. Transition diagram for the system  $M/M/n - H_2^c$

by its intensity —  $\mu_1^c$  and  $\mu_2^c$  accordingly. The service of applications in the system is carried out with intensity  $\mu$  multiplied by the number of busy service channels. At full employment (on tiers with more  $n$ ), the chart stabilizes on all the underlying tiers.

Based on the transition diagram of the markovized QS, transition intensity matrices are constructed and vector-matrix equations of transition balance between microstates are solved.

METHOD OF PROBABLE-TIME CHARACTERISTICS CALCULATION

According [7] we denote by  $S_j$  the set of all possible microstates of the system in which exactly  $j$  applications are being serviced, and by  $\sigma_j$  the number of elements in  $S_j$ . Next, in accordance with the transition diagram, we construct the intensity matrices of infinitesimal transitions:

$A_j[\sigma_j \times \sigma_{j+1}]$  — in  $S_{j+1}$  (by arrival of queries),

$B_j[\sigma_j \times \sigma_{j-1}]$  — in  $S_{j-1}$  (by completion of servicing),

$C_j[\sigma_j \times \sigma_j]$  — in  $S_j$  (by completion of cooling),

$D_j[\sigma_j \times \sigma_j]$  — departure from the microstates of the  $j$ -th tier (diagonal matrix).

The size of the matrices is indicated in square brackets here and further. The element  $(i, k)$  of any of these matrices represents the intensity of the transition from the  $i$ -th state of the  $j$ -th tier to the  $k$ -th state of the adjacent (by transitions of the type under consideration) tier.

For QS  $M/M/n - H_2^c$ , the transition matrices will have the following form:

$$A_j = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}, j = \overline{0, N-1};$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \mu\gamma_1 & 0 & \mu\gamma_2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \dots,$$

$$\dots, B_j = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & n\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, j = \overline{1, N};$$

$$C_j = \begin{bmatrix} 0 & \mu_1^c & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_2^c & 0 \end{bmatrix};$$

$$D_j = \begin{bmatrix} \lambda + \mu_1^c & 0 & 0 \\ 0 & \lambda + \min(n, j)\mu & 0 \\ 0 & 0 & \lambda + \mu_2^c \end{bmatrix}, j = \overline{0, N}.$$

Obviously, matrices  $A$  and  $C$  have the same appearance for all tiers of the diagram, and matrices  $B$  and  $D$  depend on the number of the tier, but at  $j > n$  they stabilize.

We introduce string vectors  $\gamma_j = [\gamma_{j,1}, \gamma_{j,2}, \gamma_{j,3}]$  to describe the location of QS in  $j$ -level microstates. Now let's write down the vector-matrix equations of the balance of transitions between the states [7] indicated in the diagram

$$\gamma_0 D_0 = \gamma_0 C_0 + \gamma_1 B_1,$$

$$\gamma_j D_j = \gamma_{j-1} A_{j-1} + \gamma_j C_j + \gamma_{j+1} B_{j+1}, j = \overline{1, N},$$

where  $N$  is the number of calculated tiers of the diagram.

To solve this system of equations, we will use the iterative method proposed in [8] and modified in [7]. The direction of the run during the calculation will be determined «from top to bottom» - in the direction of increasing the number of the tier. As a result of the calculation, we obtain the ratio of adjacent probabilities of the number of applications in the system

$$x_j = p_{j+1}/p_j, j = \overline{1, N}.$$

After the end of the iterations, using the values of  $x_j$ , we will make the transition to the probabilities of the states of the system according to the following algorithm:

- put the probability of a free state  $p_0$  equal to 1;
- calculate  $p_{j+1} = p_j x_j, j = \overline{1, N}$ ;
- calculate the sum  $S = \sum_{j=0}^N p_j$ ;
- normalize the received values:  $p_j = p_j/S, j = \overline{0, N}$ .

Calculation is also possible for systems without buffer limitation. In this case, it is assumed that the «tail» of the distribution of the number of applications is an infinitely decreasing geometric progression, the denominator of which is equal to the ratio of the last two calculated probabilities.

The waiting time for a newly arrived application is determined by the state of the system immediately before its arrival. In accordance with the PASTA (Poisson Arrival Sea Time Average) theorem [9], the distribution of the number of applications before the arrival of the next one coincides with the stationary one. Before the arrival of the next application, the system is in one of three microstates – type 1 or type 2 cooling or servicing.

Let's say there were already Several queries in the system before the arrival of the next query. The probabilities of the corresponding microstates are presented by the string vector  $\gamma_j = [\gamma_{j,1}, \gamma_{j,2}, \gamma_{j,3}]$ .

If the system was in the first microstate of the  $j$ -th tier (see diagram), the newly arrived application will wait for the completion of cooling of the first type plus  $(j - n + 1)$  queue promotions. LST of the appropriate time is

$$\omega_{j,1}(s) = \frac{\mu_1^c}{\mu_1^c + s} \left( \frac{n\mu}{n\mu + s} \right)^{j-n+1}.$$

In the third microstate, the second type of cooling occurs. LST of the corresponding expectation is

$$\omega_{j,3}(s) = \frac{\mu_2^c}{\mu_2^c + s} \left( \frac{n\mu}{n\mu + s} \right)^{j-n+1}.$$

The second microstate corresponds to the maintenance mode. The LST of the waiting time for the newly arrived application will be

$$\omega_{j,2}(s) = \left( \frac{n\mu}{n\mu + s} \right)^{j-n+1}.$$

We introduce a column vector

$$\omega_j(s) = [\omega_{j,1}(s), \omega_{j,2}(s), \omega_{j,3}(s)]^T.$$

Then the LST of the desired waiting time for the start of service

$$\omega(s) = \sum_{j=n}^{N-1} \gamma_j \omega_j(s). \tag{1}$$

To obtain the initial moments of the waiting time, you can perform differentiation at the zero of expression (1), or replace all the LST included in it with sets of initial moments, and their products with convolutions in moments [7].

#### RESULTS OF THE NUMERICAL EXPERIMENT

Let's calculate the system on a simulation model and numerically using the  $H_2$ -approximation for the following set of initial data: the number of service channels  $n = 3$ , the average intensity of the incoming flow  $\lambda = 2.5$ , the average service time of applications  $b_1 = 1$ , the average cooling time of the system  $c_1 = 2$ . The parameters of the  $H_2$ -distribution were selected according to three moments of different initial distributions of the cooling duration:

- degenerate  $D$  (coefficient of variation  $v = 0$ );
- uniform  $U$  on the interval  $[0; 4]$  ( $v \approx 0.577$ );
- exponential  $M$  ( $v = 1$ );
- gamma  $\Gamma$  with a shape parameter of 0.5 ( $v \approx 1.41$ );
- Weibull  $W$  with a shape parameter of 0.46 ( $v = 2.5$ ).

The results of calculating the distribution of the number of queries in the system for  $D, M$  and  $W$  distributions are shown in Figure 5. Shading shows graphs obtained using a simulation model, solid lines — based on the numerical calculation method.

The graphs show the agreement of the results even in the field of complex and paradoxical parameters of hyperexponents. The Kolmogorov distance between the results obtained by the simulation method and by approximating the  $D, U, M, \Gamma$  and  $W$  distributions of the cooling time was  $\{0.006; 0.005; 0.006; 0.004; 0.043\}$  accordingly, this indicates an acceptable approximation accuracy. Note that for  $D, U$  distributions, the hyperexponent parameters took complex values, which, however, did not affect the correctness of the final result.

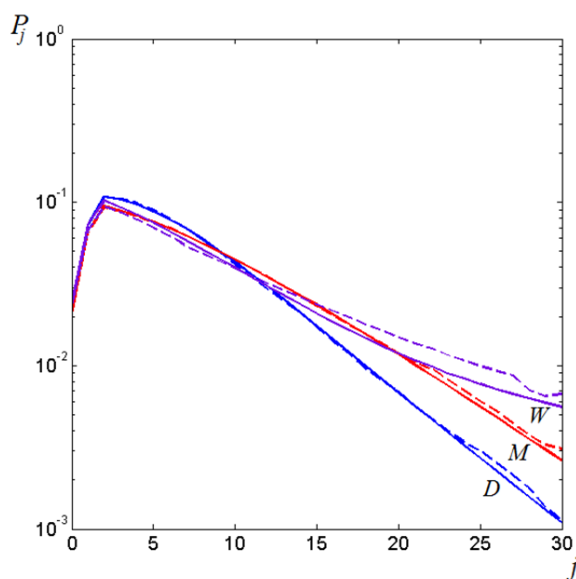


Fig. 5. Distribution of the queries number in the system  $M/M/n - H_2^c$

The increase in the Kolmogorov distance for a  $W$ -distribution with a shape parameter of 0.46 may be due to the fact that it belongs to the class of distributions with a «thick tail» and, consequently, the random variable described by it has a very large spread. In this regard, the requirements for the quality of the software random number sensors used in the simulation model are increasing.

Table 1 presents the results of calculating the initial moments of the waiting time distribution, obtained numerically (Num) and using a simulation model (Sim).

Table 1

Initial moments of waiting time

$B(t)$	$w_1$		$w_2$		$w_3$	
	Num	Sim	Num	Sim	Num	Sim
$D$	1.788	1.709	6.674	6.495	37.190	34.160
$U$	1.971	1.870	7.864	7.230	40.460	37.220
$M$	2.272	2.225	1.035	1.035	62.880	64.020
$\Gamma_{0.5}$	2.582	2.494	1.406	1.356	108.000	103.900
$W$	2.600	2.802	2.586	2.476	767.000	687.700

It follows from the presented results that with an increase in the coefficient of variation of the distribution of the «cooling» time, the average waiting time increases. The similarity of the results obtained numerically and with the help of simulation modeling allows us to conclude that the proposed method of numerical calculation of the probabilistic-temporal characteristics of the QS with «cooling» is correct.

CONCLUSIONS

Based on the conducted research, it can be concluded that the process of functioning of a scalable microservice with container virtualization can be represented by a QS model with «cooling» of service channels.

When modeling, the time delays for performing microservice scaling operations can be represented as a generalized delay before the start of servicing applications. The calculation of the probabilistic-temporal characteristics of the process under consideration is possible based on the use of an iterative

method, the accuracy of which is confirmed by the results of simulation modeling.

The presented results can be used to substantiate the requirements for the characteristics of the infrastructure of a scalable service that can function stably under dynamic load changes.

REFERENCES

1. Newman S. Sozdanie mikroservisov [Building Microservices]. Saint Petersburg, Piter Publishing House, 2016, 304 p. (In Russian)
2. Khazaei H. Performance Modeling of Cloud Computing Centers: A Thesis of the Degree of Doctor of Philosophy. Winnipeg, The University of Manitoba, 2012, 218 p.
3. Gindin S. I., Khomonenko A. D., Adadurov S. E. Chislenny raschet mnogokanalnoy sistemy massovogo obsluzhivaniya s rekurrentnym vkhodyashchim potokom i «razogrevom» [Numerical Calculations of Multichannel Queuing System with Recurrent Input and «Warm Up»], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2013, No. 4 (37), Pp. 92–101. (In Russian)
4. Khalil M. M., Andruk A. A. Testing of Software for Calculating a Multichannel Queuing System with «Cooling» and E2-approximation, *Intellektualnye tekhnologii na transporte [Intellectual Technologies on Transport]*, 2016, No. 4 (8), Pp. 22–28.
5. Khomonenko A. D., Gindin S. I., Khalil M. M. A Cloud Computing Model Using Multi-Channel Queuing System with Cooling, *Proceedings of the XIX International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2016), Saint Petersburg, Russia, May 25–27, 2016*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016, Pp. 103–106. DOI: 10.1109/SCM.2016.7519697.
6. Lokhvitsky V. A., Ulanov A. V. Chislenny analiz sistemy massovogo obsluzhivaniya s giperekspontentsialnym «okhlazhdeniem» [The Numerical Analyses of Queuing System with Hyperexponential Distribution of Cooling Time], *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]*, 2016, No. 4 (37), Pp. 36–43. DOI: 10.17223/19988605/37/4. (In Russian)
7. Ryzhikov Yu. I. Algoritmicheskiy podkhod k zadacham massovogo obsluzhivaniya: Monografiya [Algorithmic approach to queuing tasks: Monograph]. Saint Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy, 2013, 496 p. (In Russian)
8. Takahashi Y., Takami Y. A Numerical Method for the Steady-State Probabilities of a G1/G/C Queuing System in a General Class, *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 1976, Vol. 19, No. 2, Pp. 147–157. DOI: 10.15807/jorsj.19.147.
9. Ryzhikov Yu. I., Khomonenko A. D. Iteratsionnyy metod rascheta mnogokanalnykh sistem s proizvolnym zakonom obsluzhivaniya [Iterative Method for Analysis of Multichannel Queuing Systems with General Service Time Distribution], *Problemy upravleniya i teoriya informatsii [Problems of Control and Information Theory]*, 1980, Vol. 9, No. 3, Pp. 203–213. (In Russian).

Русскоязычная версия статьи © В. А. Лохвицкий, В. А. Гончаренко, Э. С. Левчик опубликована в журнале «Интеллектуальные технологии на транспорте». 2022. № 1 (29). С. 39–44.  
DOI: 10.24412/2413-2527-2022-129-39-44.

# Модель масштабируемого микросервиса на основе системы массового обслуживания с «ОХЛАЖДЕНИЕМ»

д.т.н. В. А. Лохвицкий, к.т.н. В. А. Гончаренко, Э. С. Левчик  
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского  
Санкт-Петербург, Россия  
lokhv\_va@mail.ru, vlango@mail.ru

**Аннотация.** Предложена формализация процесса функционирования масштабируемого сервиса с учетом временных затрат на конфигурирование вычислительных узлов на основе многоканальной неэкспоненциальной системы массового обслуживания с «разогревом» и «охлаждением» каналов. Выполнено снижение сложности модели путем представления длительностей «разогрева» и «охлаждения» в виде обобщенной случайной задержки перед обслуживанием. Описаны основные этапы метода расчета вероятностно-временных характеристик системы массового обслуживания с «охлаждением». Марковизация немарковских компонент рассматриваемой СМО осуществлена с использованием  $H_2$ -распределения. Получено распределение вероятностей состояний рассматриваемой СМО. Выполнено сопоставление результатов, полученных численным методом, с результатами имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** микросервис, система массового обслуживания, «охлаждение» каналов, марковизация, обобщенная задержка обслуживания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ньюмен, С. Создание микросервисов = Building Microservices / Пер. с англ. Н. Вильчинского. — Санкт-Петербург: Питер, 2016. — 304 с. — (Бестселлеры O'Reilly).
2. Khazaei, H. Performance Modeling of Cloud Computing Centers: A Thesis of the Degree of Doctor of Philosophy. — Winnipeg: The University of Manitoba, 2012. — 218 p.
3. Гиндин, С. И. Численный расчет многоканальной системы массового обслуживания с рекуррентным входящим потоком и «разогревом» / С. И. Гиндин, А. Д. Хомоненко, С. Е. Ададунов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2013. № 4 (37). С. 92–101.

4. Khalil, M. M. Testing of Software for Calculating a Multichannel Queuing System with «Cooling» and E2-approximation / М. М. Khalil, А. А. Andruk // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2016. № 4 (8). С. 22–28.

5. Khomonenko, A. D. A Cloud Computing Model Using Multi-Channel Queuing System with Cooling / A. D. Khomonenko, S. I. Gindin, M. M. Khalil // Proceedings of the XIX International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2016) (Saint Petersburg, Russia, 25–27 May 2016). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. — Pp. 103–106. DOI: 10.1109/SCM.2016.7519697.

6. Лохвицкий, В. А. Численный анализ системы массового обслуживания с гиперэкспоненциальным «охлаждением» / В. А. Лохвицкий, А. В. Уланов // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2016. № 4 (37). С. 36–43. DOI: 10.17223/19988605/37/4.

7. Рыжиков, Ю. И. Алгоритмический подход к задачам массового обслуживания: Монография. — Санкт-Петербург: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. — 496 с.

8. Takahashi, Y. A Numerical Method for the Steady-State Probabilities of a G1/G/C Queuing System in a General Class / Y. Takahashi, Y. Takami // Journal of the Operations Research Society of Japan. 1976. Vol. 19, No. 2. Pp. 147–157. DOI: 10.15807/jorsj.19.147.

9. Рыжиков, Ю. И. Итерационный метод расчета многоканальных систем с произвольным законом обслуживания / Ю. И. Рыжиков, А. Д. Хомоненко // Проблемы управления и теория информации. 1980. Т. 9, № 3. С. 203–213.

Russian version of the article © V. N. Kustov, A. I. Grokhotov, E. V. Golovkov is published  
in *Intelligent Technologies in Transport*, 2022, No. 1 (29), Pp. 45–57.  
DOI: 10.24412/2413-2527-2022-129-45-57.

# A Software Model of Masking Hidden Message in Steganography Tasks

Grand PhD V. N. Kustov, A. I. Grokhotov, E. V. Golovkov  
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
Saint Petersburg, Russia  
kvnvika@mail.ru, grokhotov.aleksei@mail.ru, jyk22@mail.ru

**Abstract.** The problem of developing a software model of masking a hidden message in HUGO stegosystems under natural noise in the communication channel using discrete chaotic Arnold cat map and Baker map, which are iterative reversible discrete chaotic transformations, is considered. All stages of software model development are considered in detail, such as the choice of the development environment, the composition of software modules and their purpose, screenshots of graphical interfaces for various modes of operation of the model. In the software model to estimate the chaotic state of a hidden message represented by a digital still image, the authors introduce the chaotic coefficient, a numerical indicator of the entropy of the probability of disordered pixels. In the developed software model, the authors propose a method for determining the maximum value of the chaotic coefficient corresponding to the maximum chaotic state of the hidden image. Testing the software model shows the practical indistinguishability of the transformed hidden message from the natural noise in the communication channel and significantly increases the safety of HUGO stegosystems.

**Keywords:** software model, HUGO stegosystem, Arnold's cat map, Baker's map, Pearson correlation coefficient, natural noise, chaotic coefficient, chaotic maps, steganology.

## INTRODUCTION

Steganography is a specific field of scientific activity related to the creation and research methods of concealment and detection of information transmission. Like cryptography, steganography has also existed since ancient times. Nevertheless, this is where the analogies end, especially in the field of theory. Over the past quarter of a century, a new discipline has been created and is successfully developing. It is mathematical steganography or steganology, in which mathematical models of stegosystems are studied.

If we consider the new trends in modern steganography, we can list the following distinctive features:

1. The increasing use of still digital photographs as covering objects with their preliminary transformation using discrete transformations in combination with already known steganography methods.
2. Research on the creation of new stegosystems with increased secrecy of data transmission.
3. Increased attention to taking into account the presence of interference in communication channels and ways to combat them.

4. Active use of discrete chaotic transformations of hidden messages to mask them under natural noise in the data channel in order to increase the security of HUGO stegosystems.

5. Wide application of new self-orthogonal noise-resistant codes for encoding covering objects with embedded hidden messages when transmitting them over highly noisy communication channels.

6. Increased attention to new developments of efficient multi-threshold decoders with optimal energy consumption characteristics, speed, and reliability of decoding processes.

7. The transition from the preliminary cryptographic transformation of the hidden message before embedding it in the covering object to the use of cryptographic changes directly in the algorithm of embedding the hidden message.

8. Active expansion of research in the field of synthesis of highly undetectable stegosystems, the so-called HUGO-systems.

In this article, the authors focused on discrete chaotic transformations of a hidden message to disguise it as natural noise in the communication channel. Users in electronic document management systems can implement such methods to increase the level of security of confidential documents transmitted in the communication channel.

## DISCRETE TRANSFORMATIONS OF COVERING OBJECTS AND HIDDEN MESSAGES IN STEGANOGRAPHY PROBLEMS

Steganography methods using a fixed digital image as a covering object consist of two broad classes: the first class of methods introduces a secret message into the spatial area of the covering object. The second class of methods does this in the frequency domain. The first class of methods modifies the spatial area of the covering object, for example, its pixels. However, these methods are subject to certain graphical transformations of the covering object, such as zooming out or zooming in, noise, compression, and other changes that make it impossible to extract the hidden message.

The second group of methods embeds hidden messages into the frequency spectrum of the covering object. This group of methods uses preliminary discrete transformations of the frequency spectrum of the covering object into the low-frequency and high-frequency parts of the spectrum. The embedding of a secret message is usually carried out in the high-frequency region of the spectrum. The researcher can use this

group of methods for various formats of covering objects. The following discrete transformations are applied:

- Discrete Cosine Transform (DCT);
- Discrete Hadamard Transform (DHT);
- Discrete Wavelet Transform (DWT);
- Discrete Fourier Transform (DFT);
- Singular Value Decomposition (SVD).

It should be noted that discrete DCT and DWT transformations are most commonly used. These methods have been successfully applied to develop widely used compression algorithms for still images JPEG2000 and JPEG.

As the authors have already noted above, in modern steganography, to increase the security of stegosystems, researchers have increasingly begun to use discrete chaotic transformations for hidden messages. Chaotic discrete transformations belong to the field of chaos theory research.

Chaos theory is a branch of mathematics that deals with systems that exhibit chaotic behavior under certain conditions. Even for the random behavior of some deterministic systems, the concept of chaos is applicable. In this case, this behavior is called deterministic chaos. It is also referred to as a branch of mathematics called deterministic chaos theory.

It is generally accepted to use the concept of entropy as the primary measure of the system's randomness. The concept of entropy plays an important role in physics and mathematics. There are various approaches to the definition of entropy, developed and described in detail in the works [1–7]. There are known applications in which entropy is used as statistical estimation of data constructed using observations. For example, such estimates are helpful in feature selection theory and detect texture inhomogeneities, signal-to-noise ratios, etc. [1–7].

The reversibility in discrete time of chaotic processes is currently well studied and proven. Any chaotic process can proceed both in the forward and reverse direction, i. e. reversible.

Systems with a high entropy value are more disorganized than those with a low one. There are many possible states in disordered systems, and there is a slight possibility of configuration in ordered systems.

At first glance, according to the second law of thermodynamics, a closed system should tend to an increasingly disordered state, i. e., to chaos. However, along with these processes, it is possible to observe reverse transitions from chaos to order at a higher level.

Breaking the order leads to the destruction of orderliness and, ultimately, leads to a structureless, disordered form of

existence of a system with maximum entropy of the system, i. e. chaos. However, no matter how chaotic it may seem, the system always represents some structure. Then chaos can act as an overcomplicated orderliness.

Thus, in a closed system, there is always a transition from Order to Chaos ( $O \rightarrow C$ ) in the process of chaotic transformations. That is, there is an alternation of changes:  $C \rightarrow O \rightarrow C \rightarrow O \rightarrow \dots$  etc.

A chaotic transformation (decomposition or mapping) is usually used for a formal description of deterministic chaos. There are about 200 different chaotic transformations (chaotic maps), and their number is constantly growing.

The list of discrete chaotic maps that can be used for chaotic transformations of hidden messages is given in Table 1.

Table 1

The list of chaotic maps that can be used for chaotic transformations of hidden messages

Map Name	Specifications	
	Spatial dimension	Number of parameters
2D Lorentz System	2	1
Arnold's Cat Map	2	2
Baker's Map	2	2
Chaotic Pool Map	2	1
Bogdan map	2	3
Circle Map	1	2
Clifford Fractal Map	2	4
The De Jong Fractal Map	2	4
Discretized Circular Van der Pol System	2	1
Duffing Map	2	5
Dyadic Transformation	1	0
Fractal-Dream System	2	0
Gingerbread Map	2	0
Map of Oenone	2	2
Horseshoe Map	2	1
Poincare Return Map	2	3

Chaotic maps are classified according to the following classification criteria (Figure 1):

1. Time-domain: continuous, discrete;
2. Spatial domain: real, rational, complex, discrete;
3. Number of spatial dimensions: 1, 2, 3, arbitrary;
4. Number of parameters: 0, 1, 2, 3, 4, 6, 9, 10, 18, variable.

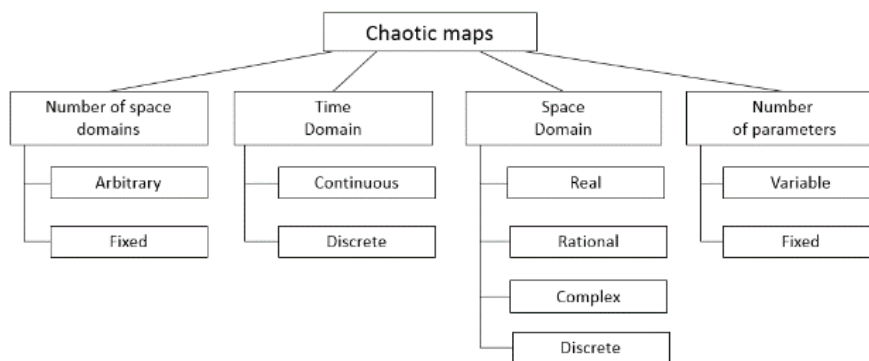


Fig. 1. Classification of chaotic maps

Discrete chaotic transformations of hidden messages presented in still images disguise them as natural noise in a steganography communication channel.

To convert a hidden message presented as a still digital image is necessary to translate it into a form that closely resembles noise in a communication channel. It is usually done using discrete chaotic maps.

Researchers should emphasize that to use a chaotic discrete mapping to mask a hidden message under natural noise, it must, among other things, have the property of encrypting (ensuring confidentiality) a two-dimensional object. When performing a chaotic mapping by the user, a secret key must be generated, and using the key ensures that the mapping is reversible. In addition, the mapping must be deterministic, finite, and easily computable.

For the study, the authors chose chaotic displays of the Arnold's Cat Map (ACM) and Baker's Map (BM) to mask hidden messages under natural noise.

ACM and BM have the following values for the listed classification features:

- time-domain — discrete;
- spatial domain — discrete;
- number of spatial dimensions — 2;
- number of parameters — 2.

Let us take a closer look at these two discrete chaotic transformations.

CHAOTIC DISPLAY OF THE ARNOLD'S CAT MAP

In discrete chaotic maps, ACM is known as the chaotic transformation on the torus surface. Vladimir Arnold first proposed ACM.

Researches can formally describe ACM as a chaotic two-dimensional transformation by the following formulas:

$$p' = (2p + q) \text{ mod } 1,$$

$$q' = (p + q) \text{ mod } 1.$$

In matrix form, these relations have the following shape:

$$\begin{vmatrix} p' \\ q' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} p \\ q \end{vmatrix} \text{ mod } 1 = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} p \\ q \end{vmatrix} \text{ mod } 1.$$

In these ratios, the sign «'» shows the dynamics of changes in parameter values at a sequential time step.

Since the surface of the torus is usually an ACM space, the change in the values of each parameter is limited to a range from zero to one. Usually, it is a square with sides equal to one, with coordinates  $q$  and  $p$ . For ACM, this is its graphic illustration. ACM got its name because Vladimir Arnold illustrated it with resembling a cat head (Figure 2).

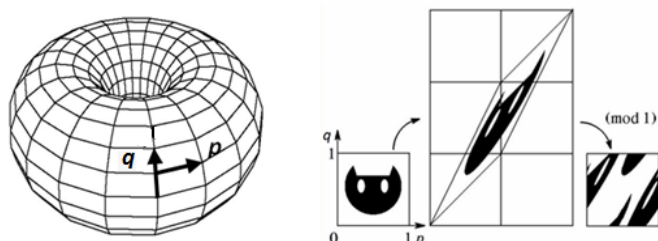


Fig. 2. Graphical representation of ACM

Note that the image subjected to AFM always retains its area and is usually used to describe the dynamics of chaotic processes.

We transform the hidden message using the ACM algorithm. As shown in Figure 3 at iteration 35, the hidden message is almost indistinguishable from noise. The iteration number can be used as a key to recover a hidden message on the recipient side.

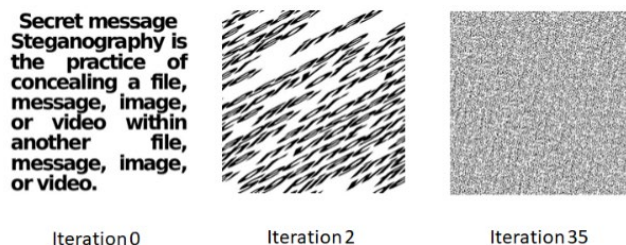


Fig. 3. Iterative transformations of a hidden message using ACM up to 35 iterations

CHAOTIC DISPLAY OF BAKER'S MAP

The Baker's Map is a chaotic mapping of a unit square into itself in dynamical systems theory. The transformation is named after the kneading operation that bakers apply to the dough. The dough is cut in half, and the two halves are folded on top of each other and compressed. BM can be represented as a two-way shift operator of a lattice model with two states. BM is topologically conjugate to the Horseshoe map. In physics, a chain of related BM transformations is used to model deterministic diffusion. As in many deterministic dynamical systems, BM is studied by its action on the space of functions defined on the unit square. BM defines an operator in the function space known as the map transfer operator. BM is an exactly solvable model of deterministic chaos. In this model, the eigenfunctions and eigenvalues of the transfer operator can be defined by researchers explicitly in the form of the following relations:

$$(p', q') = \begin{cases} (2p, q/2) & \text{if } 0 \leq p < 1/2 \\ (2 - 2p, 1 - q/2) & \text{if } 1/2 \leq p < 1. \end{cases}$$

BM is a reversible transformation. It is easy to show that the inverse transformation for the Baker map is performed according to the following relations:

$$(p, q) = \begin{cases} (p'/2, 2q') & \text{if } 0 \leq p' < 1/2 \\ (1 - p'/2, 2 - 2q') & \text{if } 1/2 \leq p' < 1. \end{cases}$$

The dynamics of transformations of the hidden message by the Baker's map is shown in Figure 4.



Fig. 4. Dynamics of hidden message transformations according to Baker's map up to 35 iterations

THE COEFFICIENT OF RANDOMNESS  
AS A MEASURE OF DISORDER

When performing chaotic transformations, a significant issue is searching for the optimal level of chaotic change of a hidden message. The authors suggest using the randomness coefficient  $K_{h_i}$  for this purpose. The search task is reduced to determining the iteration number of the chaotic transformation of the hidden message at which  $K_{h_i}$  reaches its maximum (the state of maximum randomness). That is:

$$K_h^{opt} = \max K_{h_i} \text{ for } i = 1, \dots, m,$$

where  $K_{h_i}$  is the value of the randomness coefficient at iteration number  $i$ ,  $m$  is the total number of iterations performed.

At each iteration of the chaotic transformation, the current value of  $K_{h_i}$  is determined from the ratio:

$$K_{h_i} = \frac{K_{success_i}}{K_{pixel}},$$

where  $K_{success_i}$  the total number of successful environment randomness checks is for all pixels of the hidden message image at iteration  $i$ , and  $K_{pixel}$  is the total number of pixels in the hidden message.

A check is considered successful for checking the randomness of the environment, as a result of which the condition is met for the pixel  $B_p$  being checked (located in the center of the environment):

$$B_p \neq \frac{\sum_{i=1}^n B_i}{n}, \tag{1}$$

where  $B_i$  is pixel  $i$  from the environment,  $n$  is the number of pixels in the environment.

By checking condition (1), it is possible to determine whether the environment is homogeneous (ordered) or turbulent (chaotic).

The various forms of the environment (neighborhood) used by the authors in the experiment are shown in Figure 5.

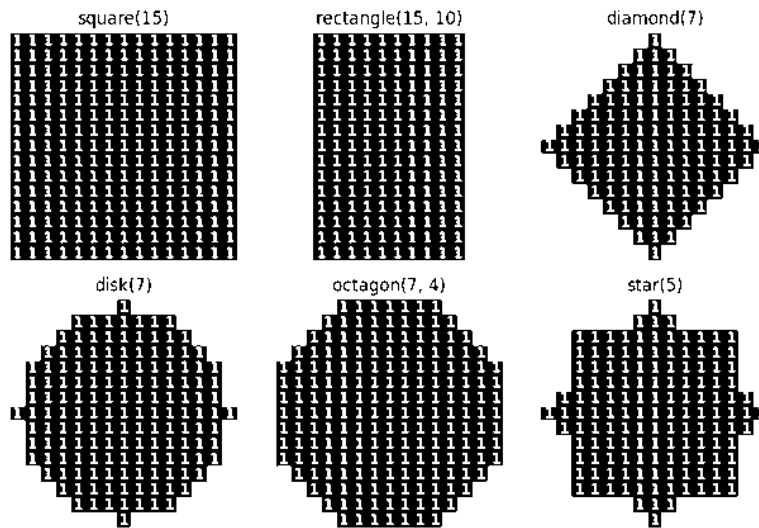


Fig. 5. Neighborhood shapes used

Before performing the first iteration, the initial value  $K_{success_i}$  is calculated for the initial state of the hidden message. Then, in each case of condition (1), the value of  $K_{success_i}$  increases by 1.

The results of calculating the functions  $K_{h_i} = f(i)$  and  $E = f(i)$  for the ACM algorithm using the neighborhood disk(7) are shown in Figure 6.

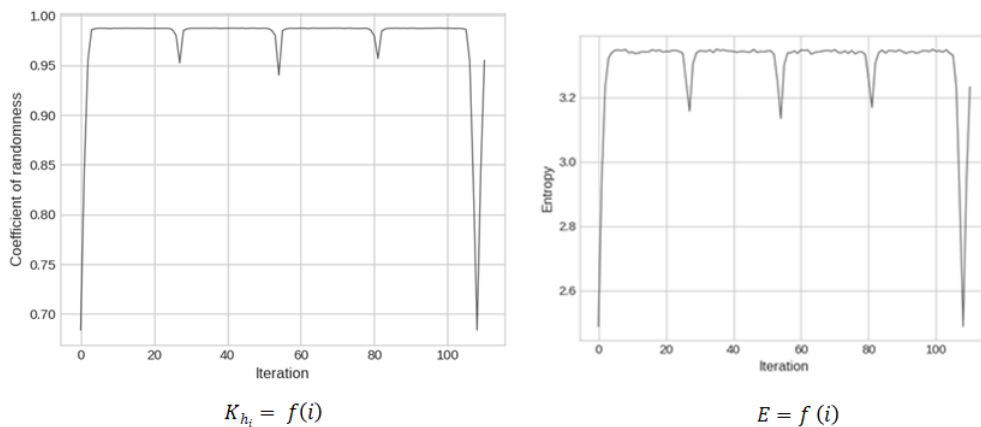


Fig. 6. The results of calculating the functions  $K_{h_i} = f(i)$  and  $E = f(i)$



The same functional dependencies for the BM algorithm have a similar appearance, and the author omits them. The maximum values of  $K_{h_i}$  and  $E$  are 0.9873422728531308 and 3.349067973898346, respectively, for the hidden message in the form shown in Figure 3 for iteration 35. The hidden message in this iteration is indistinguishable from natural noise. The Pearson correlation coefficient for these dependencies is 0.9904321037457637.

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE MODEL FOR MASKING STILL DIGITAL OBJECTS

In this section, the authors present a prototype of a software model for implementing the masking process of digital still images on the way from the sender to the recipient using their discrete transformations.

In this model, it is advised to perform a preliminary conversion of the file into a form that resembles noise in many ways, which makes it possible to increase the system's security. In the event of a leak of a secret message, it will be possible to restore it only with the private key with which the image is converted initially.

DESCRIPTION OF THE SOFTWARE ENVIRONMENT

The authors used the NetBeans IDE integrated development environment to implement the software model.

The NetBeans IDE project is supported and sponsored by Oracle, but an independent community of enthusiastic developers (NetBeans Community) and NetBeans Org. develop NetBeans.

The latest versions of NetBeans IDE support refactoring, profiling, highlighting syntactic constructions with color, auto-completion of typed structures on the fly, and many predefined code templates.

The NetBeans IDE development environment allows you to develop applications in various programming languages. For example, Java, Python, PHP, JavaScript, C, C++, Ada, and several others.

To write the code of the software model, the authors used the Java programming language.

The general graphical interface of the development environment is shown in Figure 7.

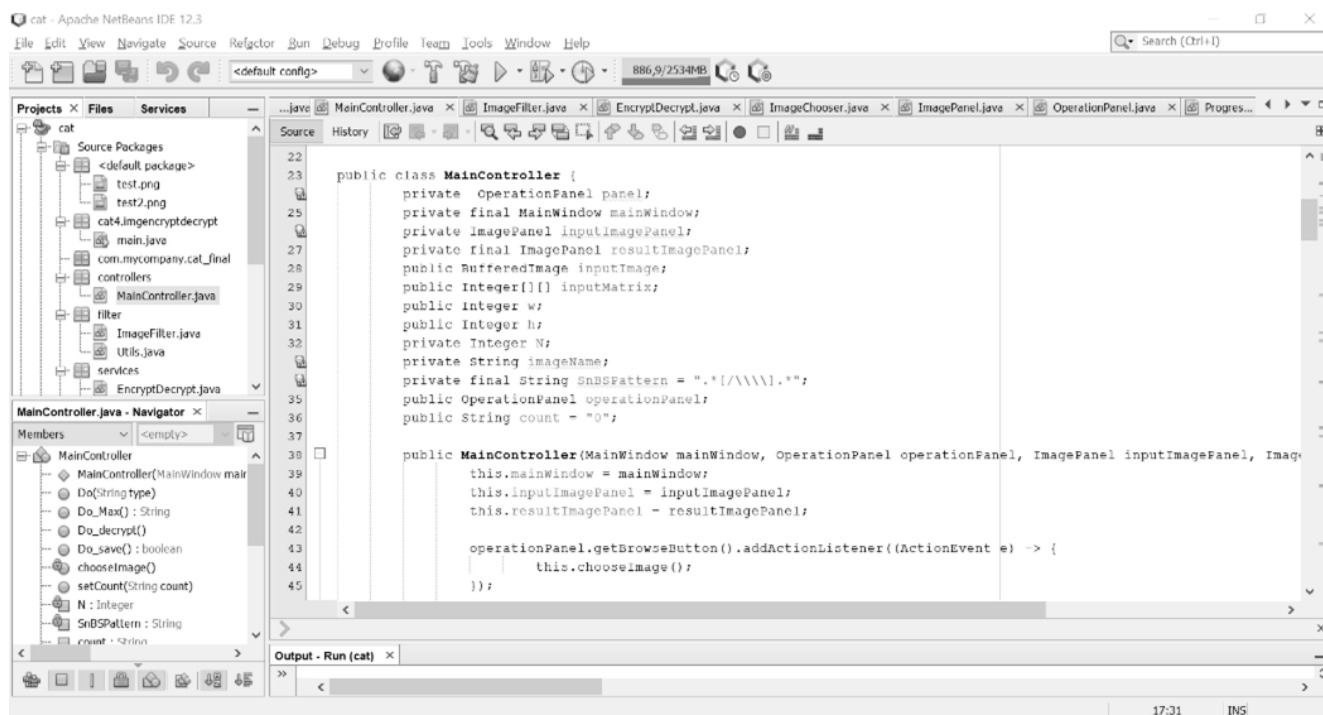


Fig. 7. The general graphical interface of the development environment

DESCRIPTION OF THE PROGRAMMING LANGUAGE

Java is a strongly typed object-oriented programming language. Sun Microsystems Company developed it. Oracle Company later absorbed Sun Microsystems Company.

Characteristic features of Java:

1. The language is easy to use, and it has fixed bugs from other languages. For example, pointers are not used.
2. Object-oriented language.
3. Steady language. Java programs are insured against many errors.
4. Safe language.
5. Network (distributed language).
6. Architecture-independent (platform-independent) language.

7. Interpreted.
8. Portable.
9. High-performance.
10. Multithreaded.
11. Dynamic.

STRUCTURE OF THE DEVELOPED SOFTWARE

The structure of the developed software package is shown in Figure 8.

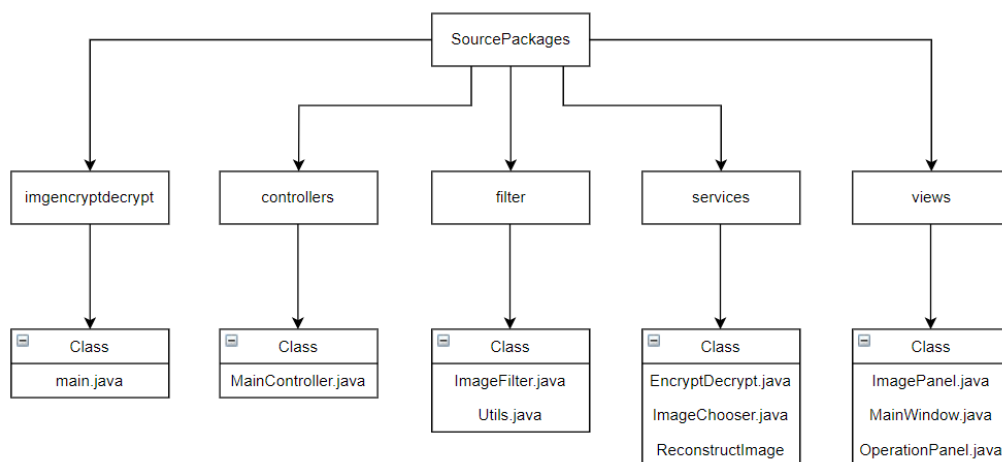


Fig. 8. The structure of the developed software package

Main.java is the main class, creates objects of auxiliary classes, and calls the corresponding methods.

MainController.java is a class that implements event handling for various user actions. It also developed methods for creating interface panels for the user. The main methods of the class are:

- chooseImage (): responsible for processing user actions when selecting an image. Also converts the source object into an array of bytes;
- Do(): The method calls the encrypt encryption function and displays the image on the panel after each iteration;
- Do\_Max (): The method is started when the button is pressed, which starts the process of converting the image until it returns to its original state;
- Do\_decrypt (): The method calls the decrypt encryption function and displays the image on the panel after each iteration;
- Do\_save (): The method saves the converted image to the directory specified by the user.

ImageFilter.java class that checks the format of the selected image for conversion.

EncryptDecrypt.java – this is the main class implementing the discrete chaotic transformation algorithm. Main methods of the class:

- ACM(): the main method of this class, which implements an algorithm for masking images into noise;
- ACM\_Max (): the method implements the processing of the event that the user initiates by clicking on the button to transform the image until it returns to its original state;
- Compare(): an auxiliary method for ACM\_Max (), checks for compliance, after each iteration of the transformation, of the transformed object with the original image.

ReconstructImage.java is a class that implements methods for converting an image in png or jpeg format into an array of bytes.

Let us proceed to consider the block diagram of the program interface (see Figure 9).

The class is responsible for the main user window MainWindow.java. On top of the main window, windows are drawn on which the original image and the image after the transformation are displayed. The class is responsible for this panel ImagePanel.java. At the bottom of the window, there is

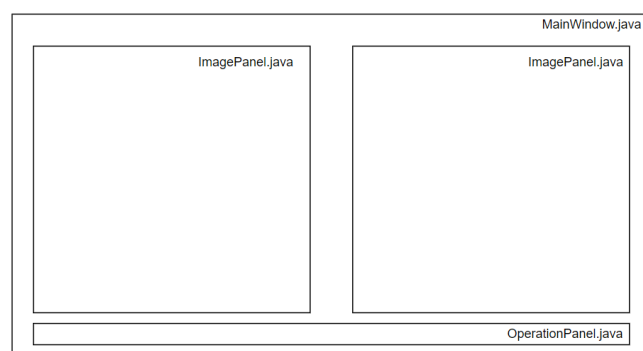


Fig. 9. Block diagram of the program interface

a toolbar with the main user functionality. The class is responsible for this panel OperationPanel.java.

The following built-in libraries were used during the development process (see Figure 10):

1. AWT (Abstract Window Toolkit) is a built-in library in Java for working with graphical objects, used to draw the user interface.
2. IO (input/output) is a built-in library in Java for organizing input/output streams, used to read an image file and draw it on the user panel.
3. Net is a built-in library in Java for organizing connections, used to load an image file from the file system into the program.
4. Util is a built-in library in Java for manipulating system components.
5. ImageIO is a built-in library in Java for loading and unloading graphic images to and from the buffer, used for intermediate saving of the converted image.
6. Swing is a built-in library in Java for working with the graphical shell.

THE STRUCTURE OF THE SOFTWARE BEING DEVELOPED

To implement the simulation, an algorithm was developed that reflects the sequence of actions necessary to perform.

Selecting a steel digital object to mask into noise. In the software model, it is possible to use two image formats: PNG and JPEG.

PNG stands for Portable Network Graphics file and adheres to lossless compression.

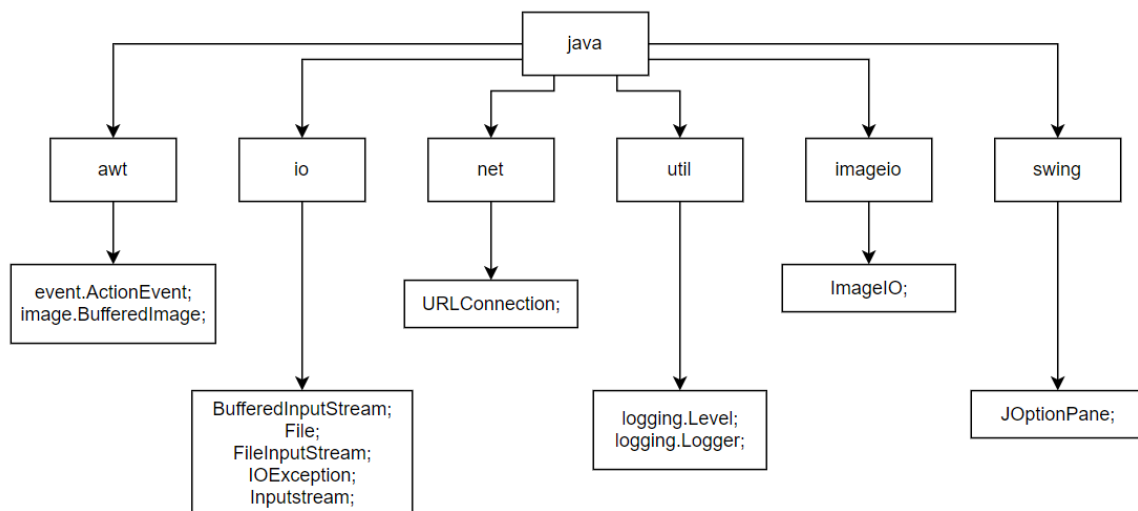


Fig. 10. List of used libraries

Unlike JPEG, saving a digital file in PNG format does not reduce its quality. PNG format is proper when images have a transparent background (for example, a company logo).

They can be used as video overlays or when combining two or more images as layers.

The JPEG or JPG file format is a standard extension for digital images. JPEG files come from all digital cameras that you can use on different platforms. JPEG is the acronym of the Joint Photographic Expert Group — after the name of the developer organization.

When you take an image with the camera, at a minimum, you will get an image in JPEG format.

The advantage is that you can edit raw images repeatedly without losing quality.

JPEG image files are used for the immediate exchange of images.

Figure 11 shows a block diagram describing the logic of the software module at the stage of selecting the source image.

The first step of working with the software module is to select an object for conversion. The user has the option to choose between two image formats, png or jpeg. These actions take place through the user interface. After selecting an object, the program checks the image format. If it satisfies the condition, then the conversion object is passed to the Encrypt module.

```
private void choose Image() {
    ImageChooser imageChooser = new ImageChooser();
    ...
    File input Image File = imageChooser.getSelectedFile();
    ...
}
```

Figures 12 show a flowchart describing the operation of the ACM() method. This method masks the original image into noise.

```
private Integer[ ][ ] ACM(Integer[ ][ ] matrix)
{
    ...
    Integer[ ] hasil = new Integer[2];
    Integer[ ][ ] result = new Integer[N][N];
    int number;
    ...
}
```

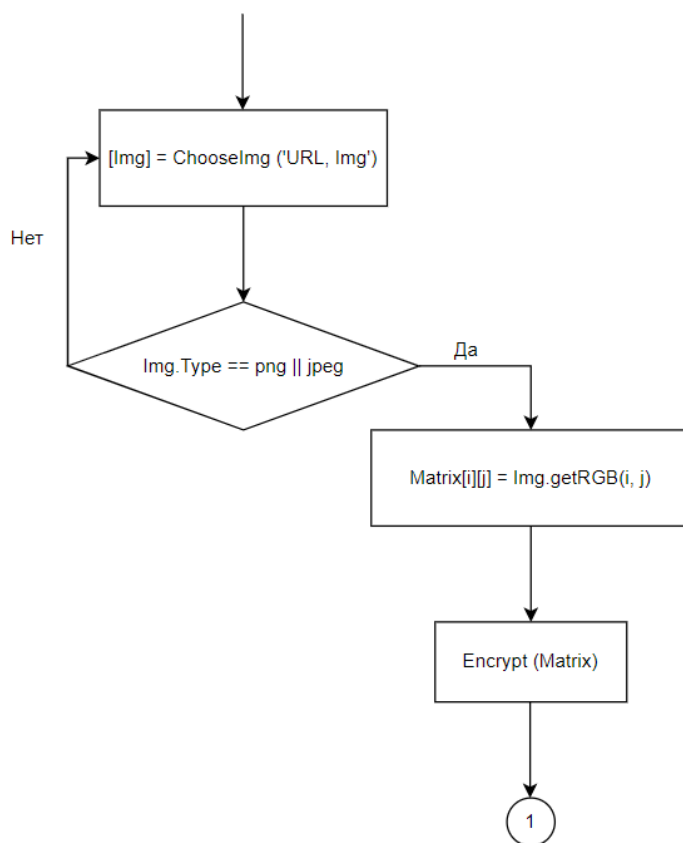


Fig. 11. The image reading

```
...
number = 1;
for (int i = 0; i < number; i++) {
    for (int a = 0; a < N; a++) {
        for (int b = 0; b < N; b++) {
            hasil[0] = (1*a + 1*b) % N;
            hasil[1] = (1*a + 2*b) % N;
            result[a][b] = matrix[hasil[0]][hasil[1]];
        }
    }
}
...
```

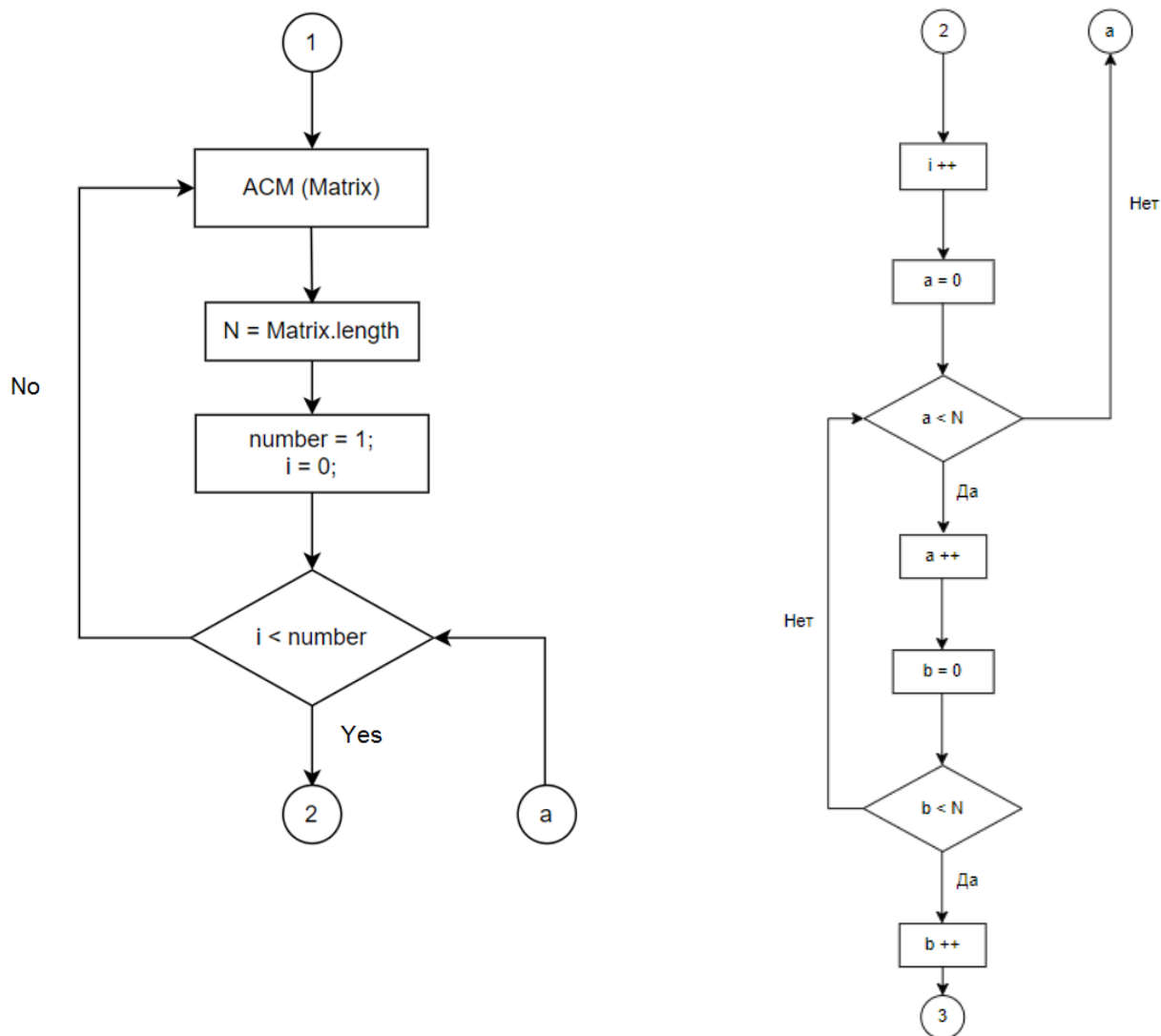


Fig. 12. A loop that transforms the original image into a matrix

Figure 13 shows the output of the converted image to the user interface.

```

for (int i = 0; i < result Image.getWidth(); i++) {
for (int j = 0; j < resultImage.getHeight(); j++) {
resultImage.setRGB(i, j, result[i][j]);
...
this.result Image Panel.setImage(resultImage);
...
    
```

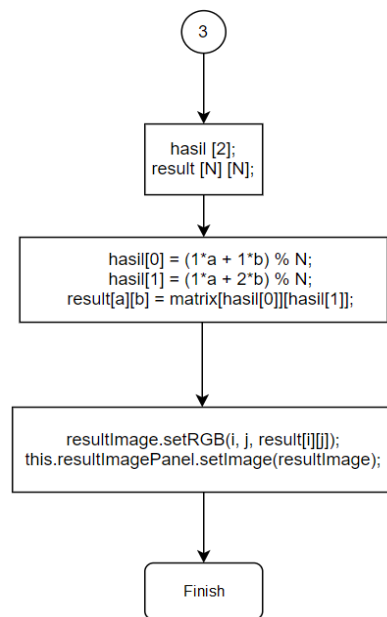


Fig. 13. Output of the resulting image to the panel

SCREENSHOTS OF THE SOFTWARE PACKAGE

Figure 14 shows the user interface of the developed software package. After launching the program, the user gets to the main application window.

Next, click Browse. After clicking on this button, the event handler will display a menu window on the main panel. The user will be prompted to select a transformation object from the file system of the personal computer see Figure 15.



Fig. 24. Programming interface of the initial user window

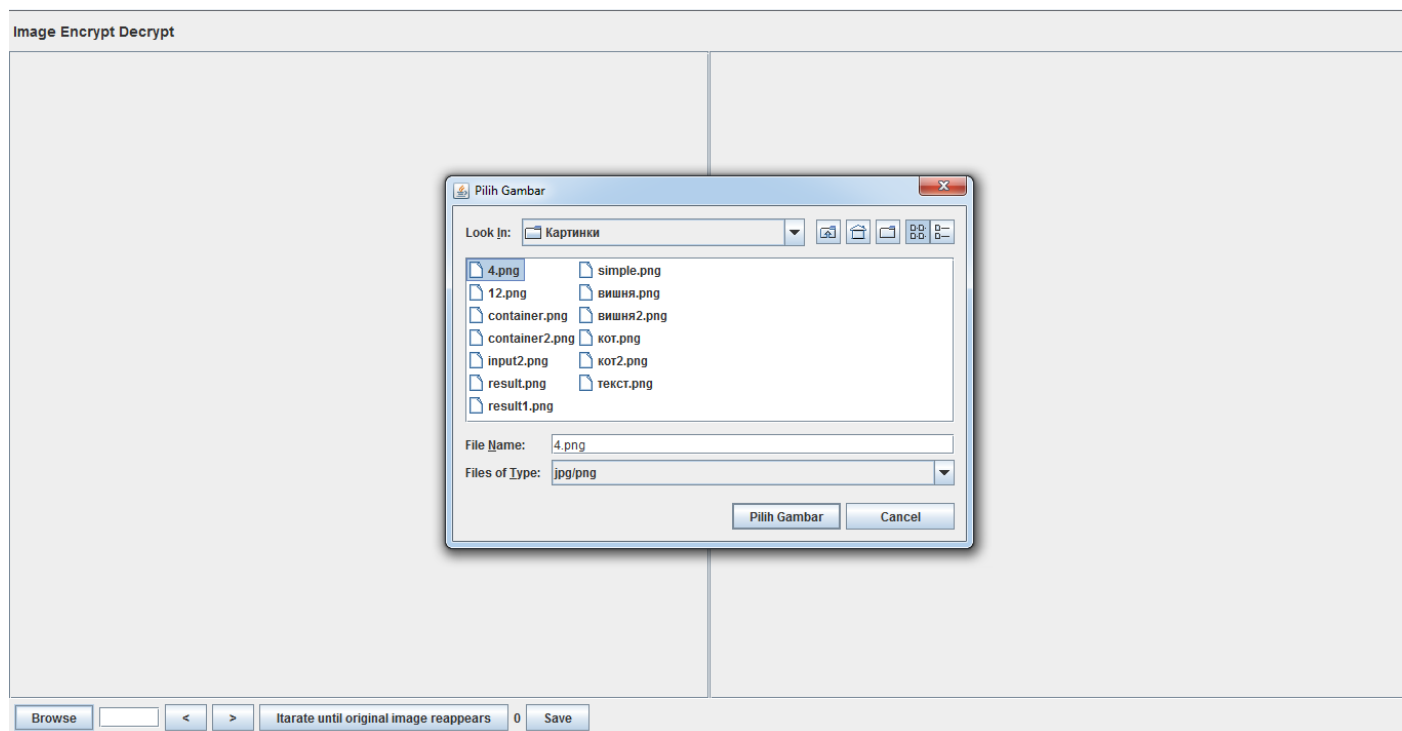


Fig. 35. Image selection

Suppose that the user has selected the image shown in Figure 16. The selected image will be displayed on the left side of the user main panel.

There is a toolbar at the bottom of the window. This panel prompts the user to perform the following actions.

An empty field for entering the number of iterations — after entering a number in this field that will indicate the number of iterations, the program will start converting the image and display the result in the right part of the panel.

Arrows pointing to the right and left — after clicking on these toolbar elements, one iteration of the image transformation will be performed.

Figure 17 shows the state of the image panel after the 114 iterations. In the right part of the panel, the drawing has turned into almost natural noise.

In Figure 18, the user re-entered the number of iterations 114 in the input field, and the result of the program is displayed in the right part of the panel. It should be noted that after 228 iterations, this image takes its original form. Thus, the transformation process is reversible.



Fig. 46. The original image

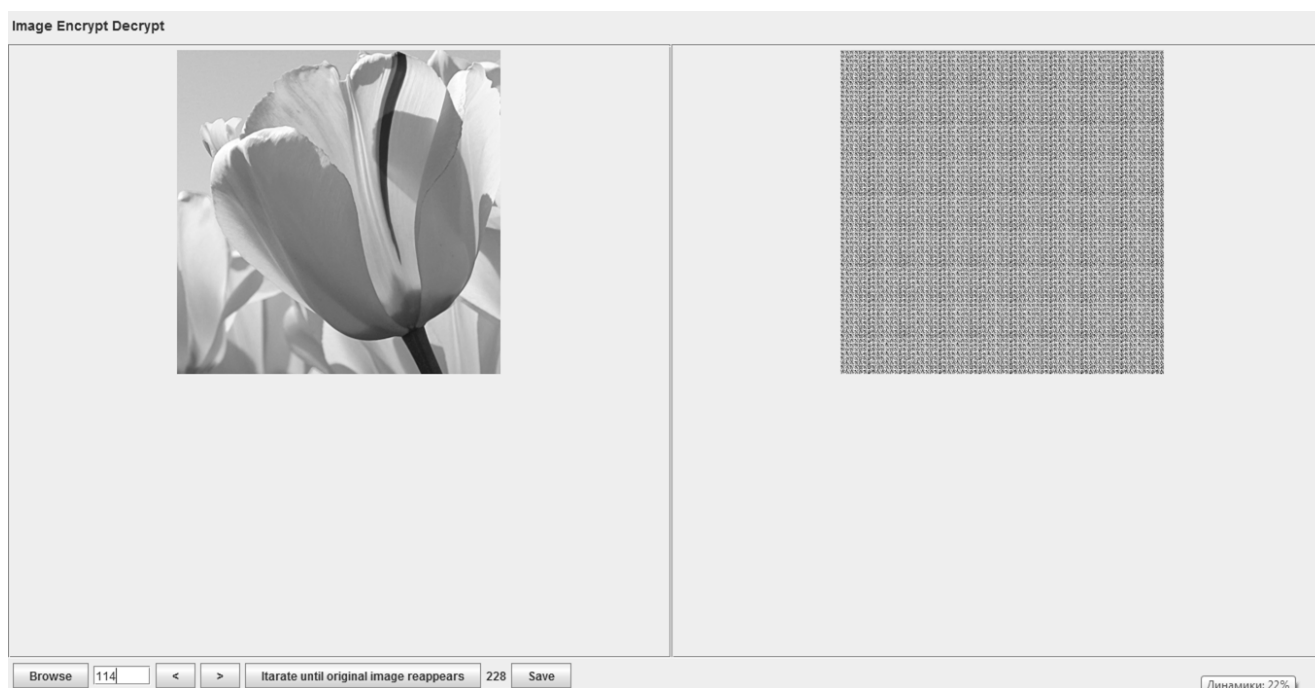


Fig. 57. The state of the image panel after the 114 iteration

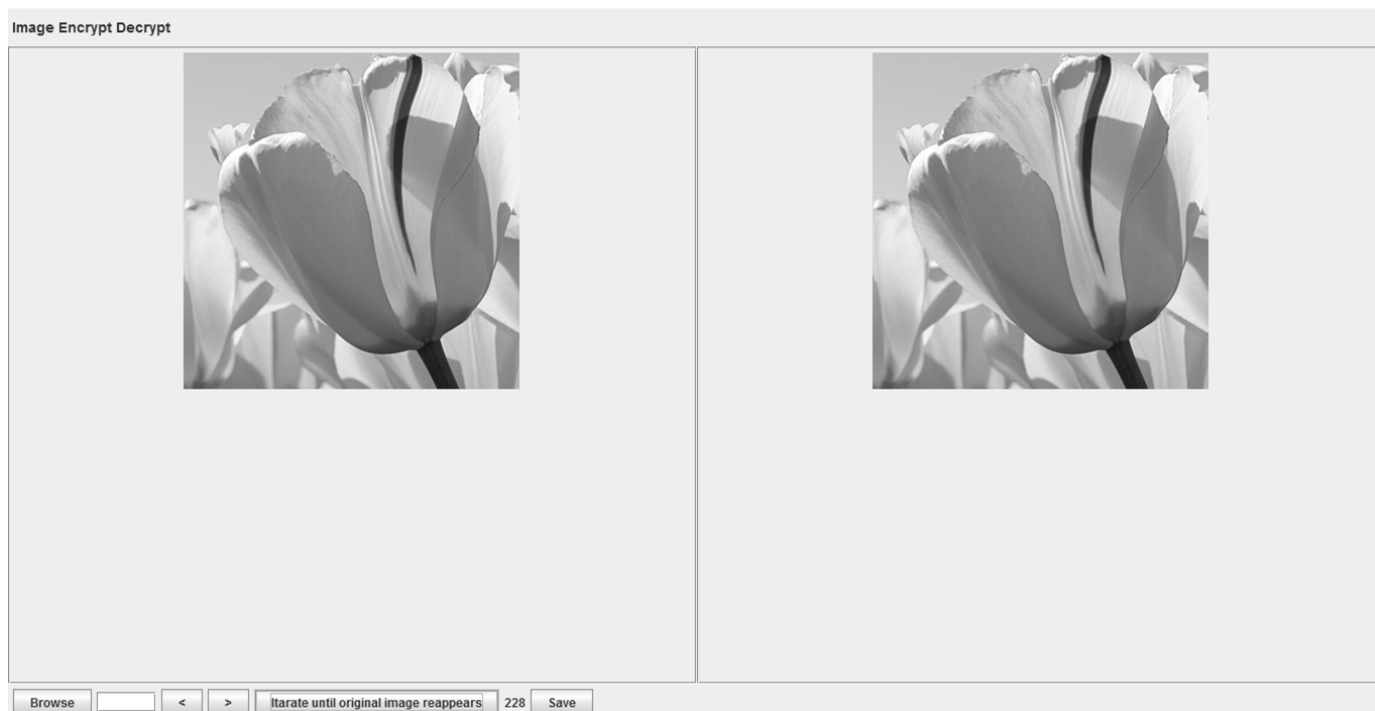


Fig. 68. The state of the image panel after the 228 iterations

#### CONCLUSION

Thus, in this article, the authors have considered and solved the problem of optimal masking of a hidden message under natural noise in the communication channel. Two discrete chaotic transformations of ACM and VM are investigated to do it. As a measure of randomness, it is proposed to use the randomness coefficient, which is easily calculated and is comparable to entropy. The task of optimizing the masking of a hidden message, thus, is reduced to finding an iteration at which the randomness coefficient takes the maximum value. The final result of the author's work is the development of a software package for discrete transformations of hidden messages represented by still images to a form indistinguishable from natural noise. The software package developed by the authors is carefully illustrated with screenshots.

#### REFERENCES

1. Benguigui L. The Different Paths to Entropy, *European Journal of Physics*, 2013, Vol. 34, No. 2, Pp. 303–321. DOI: 10.1088/0143-0807/34/2/303.
2. Peng H., Long F., Ding C. Feature Selection Based on Mutual Information: Criteria of Max-Dependency, Max-Relevance, and Min-Redundancy, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, Vol. 27, Is. 8, Pp. 1226–1238. DOI: 10.1109/TPAMI.2005.159.
3. Pál D., Póczos B., Szepesvári C. Estimation of Rényi Entropy and Mutual Information Based on Generalized Nearest-Neighbor Graphs, *Advances in Neural Information Processing Systems 23 (NIPS 2010): Proceedings of the 24th Annual Conference on Neural Information Processing Systems, Vancouver, Canada, December 06–09, 2010*. New York, Curran Associates Inc., 2019, Pp. 1849–1857.
4. Archer E. W., Park I. M., Pillow J. W. Bayesian Entropy Estimation for Countable Discrete Distributions, *The Journal of Machine Learning Research*, 2014, Vol. 15, Pp. 2833–2868.

5. Hall P., Morton S. C. On the Estimation of Entropy, *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 1993, Vol. 45, No. 1, Pp. 69–88. DOI: 10.1007/BF00773669.

6. Miller E. G. A New Class of Entropy Estimators for Multi-Dimensional Densities, *Proceedings of the 28th IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '03), Hong Kong, China, April 06–10, 2003, Vol. 3*. IEEE, 2003, Pp. 297–300. DOI: 10.1109/ICASSP.2003.1199463.

7. Sricharan K., Wei D. Hero III A. O. Ensemble Estimators for Multivariate Entropy Estimation, *IEEE Transactions on Information Theory*, 2013, Vol. 59, Is. 7, Pp. 4374–4388. DOI: 10.1109/TIT.2013.2251456.

Русскоязычная версия статьи © В. Н. Кустов, А. И. Грохотов, Е. В. Головков опубликована в журнале «Интеллектуальные технологии на транспорте». 2022. № 1 (29). С. 45–57.  
DOI: 10.24412/2413-2527-2022-129-45-57.

# Программная модель маскировки скрытого сообщения в задачах стеганографии

д.т.н. В. Н. Кустов, А. И. Грохотов, Е. В. Головков

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

kvnvika@mail.ru, grohotov.aleksei@mail.ru, jyk22@mail.ru

**Аннотация.** Рассматривается проблема разработки программной модели маскировки скрытого сообщения в стегосистемах HUGO в условиях естественного шума в канале связи с использованием дискретной хаотической карты кота Арнольда и карты Бейкера, которые являются итеративными обратимыми дискретными хаотическими преобразованиями. Подробно рассмотрены все этапы разработки программной модели, такие как выбор среды разработки, состав программных модулей и их назначение, скриншоты графических интерфейсов для различных режимов работы модели. В программной модели для оценки хаотического состояния скрытого сообщения, представленного цифровым неподвижным изображением, введен коэффициент хаотичности — числовой показатель энтропии вероятности неупорядоченных пикселей. В разработанной программной модели предложен метод определения максимального значения коэффициента хаотичности, соответствующего максимальному хаотическому состоянию скрытого изображения. Тестирование программной модели показывает практическую неотличимость преобразованного скрытого сообщения от естественного шума в канале связи и значительно повышает безопасность стегосистем HUGO.

**Ключевые слова:** программная модель, стегосистема HUGO, карта кота Арнольда, карта Бейкера, коэффициент корреляции Пирсона, естественный шум, коэффициент хаотичности, хаотические карты, стеганология.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Benguigui, L. The Different Paths to Entropy // European Journal of Physics. 2013. Vol. 34, No. 2. Pp. 303–321. DOI: 10.1088/0143-0807/34/2/303.  
2. Peng, H. Feature Selection Based on Mutual Information: Criteria of Max-Dependency, Max-Relevance, and Min-Redundancy / H. Peng, F. Long, C. Ding // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2005. Vol. 27, Is. 8. Pp. 1226–1238. DOI: 10.1109/TPAMI.2005.159.

3. Pál, D. Estimation of Rényi Entropy and Mutual Information Based on Generalized Nearest-Neighbor Graphs / D. Pál, B. Póczos, C. Szepesvári // Advances in Neural Information Processing Systems 23 (NIPS 2010): Proceedings of the 24th Annual Conference on Neural Information Processing Systems (Vancouver, Canada, 06–09 December 2010). — New York: Curran Associates Inc., 2019. — Pp. 1849–1857.

4. Archer, E. W. Bayesian Entropy Estimation for Countable Discrete Distributions / E. W. Archer, I. M. Park, J. W. Pillow // The Journal of Machine Learning Research. 2014. Vol. 15. Pp. 2833–2868.

5. Hall, P. On the Estimation of Entropy / P. Hall, S. C. Morton // Annals of the Institute of Statistical Mathematics. 1993. Vol. 45, No. 1. Pp. 69–88. DOI: 10.1007/BF00773669.

6. Miller, E. G. A New Class of Entropy Estimators for Multi-Dimensional Densities // Proceedings of the 28th IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '03), (Hong Kong, China, 06–10 April 2003). — Vol. 3. — IEEE, 2003. — Pp. 297–300. DOI: 10.1109/ICASSP.2003.1199463.

7. Sricharan, K. Ensemble Estimators for Multivariate Entropy Estimation / K. Sricharan, D. Wei, A. O. Hero III // IEEE Transactions on Information Theory. 2013. Vol. 59, Is. 7. Pp. 4374–4388. DOI: 10.1109/TIT.2013.2251456.



# Logistic Digital Ecosystem of the Multimodal Freight Terminal Networks

PhD A. I. Mochalov, Grand PhD Yu. I. Palagin  
Saint-Petersburg State University of Civil Aviation  
Saint Petersburg, Russia  
mai\_d@mail.ru, profypal@yandex.ru

PhD N. V. Ivanova  
Emperor Alexander I St. Petersburg  
State Transport University  
Saint Petersburg, Russia  
nataliv62@gmail.com

PhD H. Ruohomaa  
Häme University  
of Applied Sciences (HAMK)  
Hämeenlinna, Finland  
heikki.ruohomaa@hamk.fi

**Abstract.** Processes of digitalization, increasing amount of data (and big data) offered by technologies have pushed people and businesses to break through towards the fourth industrial transformation. That started to change some business processes in the transport logistics area due to estimating and optimizing the efficiency of whole value chain clearer. The article examines the transition to ecosystem-based development by means of combination of the mathematical models, routing algorithms and calculation algorithms for cargo flows in transport-terminal road-air-sea-railways networks of multimodal transport operators during transformation period with virtual services.

**Keywords:** ecosystems, digital multimodal cargo operators, transport-terminal networks ecosystem, optimal delivery routing, terminal virtual services, planning, algorithms, digitalization.

## INTRODUCTION

First results of the digital transformation lead the rapid development of processes of digitalization, increasing amount of data (and big data) offered by technologies have pushed people and businesses to break through towards the fourth industrial transformation including transportation area such as for instance for cargo flows in transport-terminal road-air-sea-railways networks of multimodal transport operators. It is estimated data creation including transport area will increase to a huge 175 zettabytes (ZB) by 2025. This is ten times the amount of data generated in 2017 (see Figure 1) [1]. That started to

change some business processes in the transport logistics area due to estimating and optimizing the efficiency of whole value chain clearer.

Many of different sensors, devices and computers began are connected and communicate with one another to improve cargo flows in transport-terminal road-air-sea-railways networks of multimodal transport operators, in the end, to make decisions without human involvement or to help to people in the decision-making processes. In the nearest future it is supposed that everything will be linked virtually, it means both the virtual and physical transport-terminal road-air-sea-railways networks of multimodal transport operators can be connected in unit network as well. This will transform whole economies, transportation issues and societies and people behavior.

With so many sensors, devices and computers, 90 % of the world's data has been generated in just the past two years, with 2.5 quintillion bytes of data being collected every day. It is predicted that 60 % of the world's logistics and freight transport data is collected through applications based on artificial intelligence, machine-to-machine technology, automation and advanced data collection from smart devices located in road, air, maritime and rail transport. More over the collection of such data is expected to grow 20-fold over the next 10 years.

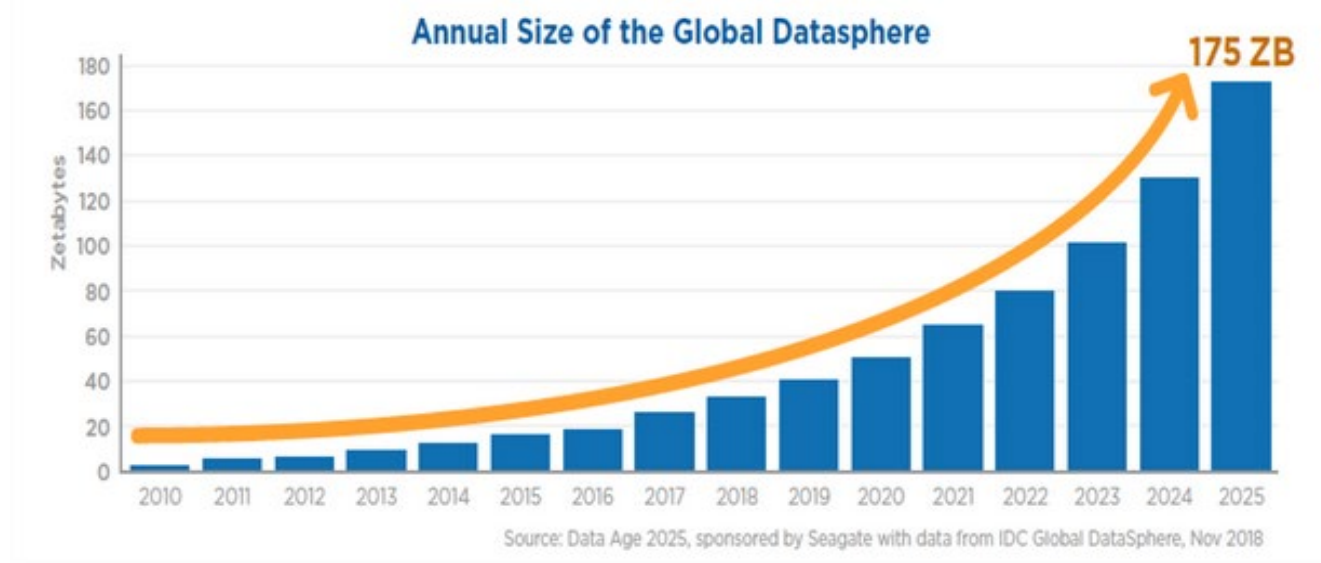


Fig. 1. Global growth trend of data 2010–2025

The implication of this increase may be that data is an increasingly important factor affecting all aspects of the distribution of freight flows and the relationship between multimodal transport operators. Smart devices and the Internet of Things are already creating a volume of «vital» data for network of multimodal transport operators and as freight flows distribution too.

Therefore, it is essential to ensure that businesses and business environments are aware of where and how data growth is happening and are ready to manage data effectively and ensure that benefits have achieved. This is very important

in the case of logistics and transportation, when the delivery time and timing of freight is important.

In addition to the societal impact, poorly managed increasing amount of data could result losing revenue in existing business by having operational inefficiencies and bad customer experience. By 2025 over 20 % of the data collected globally could be useful for analytics [1]. The same applies to logistics and transportation business.

New ITC based technologies make possible 4.0 Industry development and give opportunities to reengineer value chains and create new business models (see Figure 2) [2].

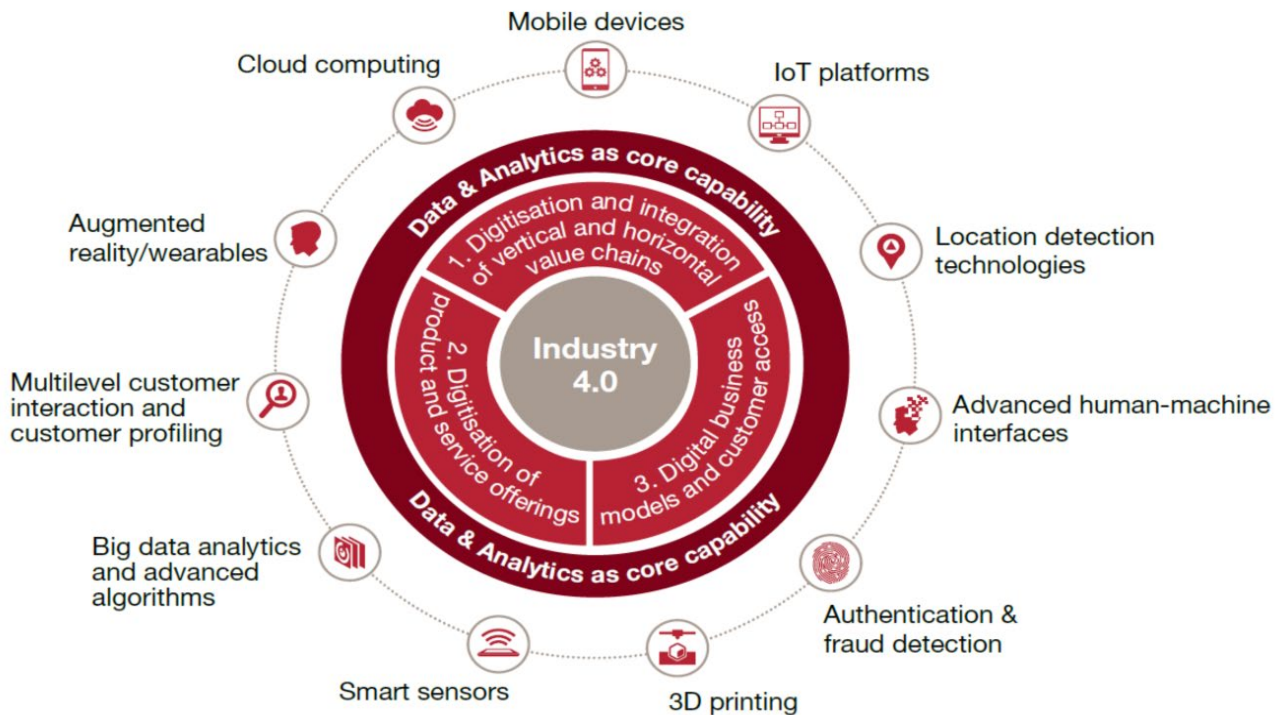


Fig. 2. Industry 4.0 framework and contributing digital technologies

In present time the increasing consumer demands for door-to-door service (door-to-door cargo delivery) makes the relevant requirements to the participants of the transportation process such as freight-forwarder companies which serve and extend the services what provided by an air company for the benefit of commercial customers. Such freight-forwarding companies are freight transportation agents, perform follow services:

- customs clearance;
- handling of goods;
- mutual settlements etc.

There are number of large-scale freight-forwarder companies which have own terminal networks. Such terminal networks consist of:

- cargo distribution and sorting centers;
- organized distribution centers at the airports and railway stations;
- own network of road, air, sea and railway transportation.

Logistics and transportation companies operate as a multimodal transport operator (MTO) by giving the client their own (not an agency) waybill and number the variety of services.

Among those services there are two main types of service: express delivery and economy delivery. In the first case, the basic requirement of customers is the minimum time and reliability of delivery with reasonable rates. In the second case the basic requirement of customers a minimum transportation cost at reasonable requirements to transit time. Possibilities to present the widest range of services for today and to comply with the diverse requirements of customers determinate the competitiveness of multimodal operators.

In the nearest future the competitiveness of networks of the multimodal cargo operators will based as well in the integration the ICT, physical IoT, and IoT-devices to optimize the efficiency of multimodal cargo operations and services and in unit those operators and their services in the digital ecosystems for example in our case in ecosystem of multimodal freight terminal network. This digital ecosystem of multimodal freight terminal network can use and combine systems and techniques for the determination and optimization of cargo flows in transport-terminal road-air-sea-railways networks of multimodal transport operators during transformation period with virtual services.

THEORETICAL FRAMEWORK / ECOSYSTEM BASED DEVELOPMENT ON FREIGHT TERMINAL NETWORK CONTEXT

Organization exists in multiple business ecosystems. These business ecosystems are dynamic networks of entities communicating with each other to create value for participants. The challenge is deciding how your organization will survive and thrive in its ecosystem. The degree of openness within ecosystems is managed by strategies, common goals and shared interest. An ecosystem may be hybrid, private or public. Organizations often participate in a hybrid of public and private ecosystems [3].

One approach on the development of the ecosystems is co-evolution; where ecosystem member organizations or parts of the ecosystem evolve in alignment. An example of co-evolution is a Digital Ecosystem and a Business Ecosystem evolution, which Moore (2003) introduces as the Digital Business Ecosystem (DBE) [4].

Ecosystems can co-evolve in a structural level in addition to species, roles and functions.

Figure 3 illustrates a Digital Business Ecosystem structure where the business ecosystem and digital ecosystem are coupled to form a viable dynamic innovation ecosystem.

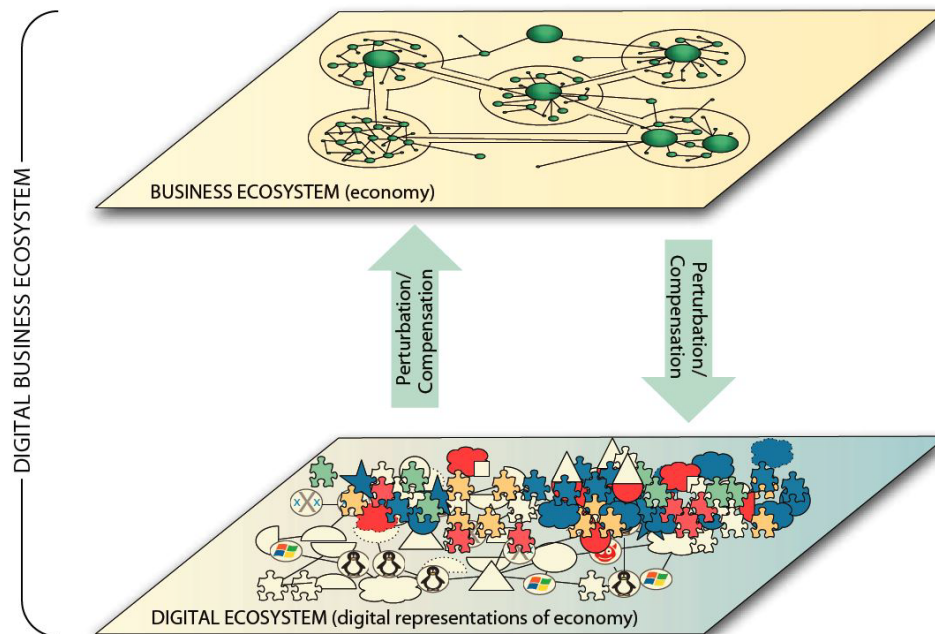


Fig. 3. Digital Business Ecosystem

The digital ecosystem influences enterprises, their social and business networks, and the business ecosystem affects the organisms of the digital ecosystem [4].

New ICT-related technologies make Industry 4.0 development possible and give opportunities to re-engineer value chains and create new business models. The growth of connections brings the new possibilities and solutions for the business. Exponential growth of data brings also new challenges and indicates the birth of a new kind of business models. This «smartness» requires greater connection and collaborations. This is where the ‘explosion’ of platforms and ecosystems is occurring [5].

MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION IN FRAME OF LOGISTIC ECOSYSTEM OF THE MULTIMODAL FREIGHT TERMINAL NETWORKS

This chapter is devoted to the mathematical models, the routing algorithms and calculation algorithms for cargo flows in transport-terminal road-air-sea-railways networks of multimodal transport operators for the logistic ecosystem of the multimodal freight terminal networks creation.

Those models and the algorithms help to calculate the optimal L-shortest routes, which can be optimal according to various criteria including customer preferences and simulate

the processes of delivery and distribution of freight flows to the optimal routes according a specified traffic schedule in the frame of logistic ecosystem [6–9].

THE MULTIMODAL FREIGHT TERMINAL NETWORK’S STRUCTURE

For the mathematical modeling understanding we will adhere to the following terminology and basic statements:

- transport terminals network is a set of nodes and arcs;
- network nodes are its terminals;
- network arcs are transport routes which connecting the two terminals;
- nodes are the distribution centers, which handle and sort cargo for transportation.

Digital logistic ecosystem consists of types of distribution centers:

- head (hub) distribution center;
- gateway distribution centers.

The head distribution center interconnects and works with directly with customers (shipper and consignee) providing auto-service by regular road routes between terminals, sort, consolidate and collects the goods from the shipper (the initial stage of carriage) for the final recipient’s delivery [7]. Gateway distribution centers are intended to transfer (and receive)

cargo from distribution center to air, sea, and rail carriers and located at airports, seaports and train station. Air, sea and rail routes are linked only respective type of gateway distribution centers between each other. Transportation between head distribution center and gateway distribution centers are carried out by road.

The considerate logistic digital ecosystem includes three interrelated parts (Figure 4):

1. The central network (covers the European part of Russia and consists of 17 head DC what are linking their regular networks of road routes, 8 GDC to air network and air routes which linking the gateway terminals of air network. Terminals are located in St. Petersburg, Moscow (North and South terminals), Voronezh, Rostov-on-Don, Krasnodar, Nizhny Novgorod, Kazan, Yaroslavl, Samara and Yekaterinburg).

2. The eastern part (consists of 7 head DC in major cities of Siberia and the Far East of Russia, 7 gateway DC to aviation network (at local airports), 7 gateway terminals to the rail network (at the local railway station) and connecting them network of routes. The eastern part connects to the central part of network through the head DC in Yekaterinburg and Omsk, and then in the direction of the Trans-Siberian Railway to the head DC in Omsk to head DC in Novosibirsk, Krasnoyarsk, etc. up to Vladivostok).

3. The western part (consists of 7 head DC in Western Europe (Helsinki, Berlin, Frankfurt am Main, Hamburg, Rotterdam, Paris, London), 6 gateway DC to aviation network, 1 rail gateway terminal (at the Berlin train station), 6 sea gateway terminals and connecting them the network of routes).

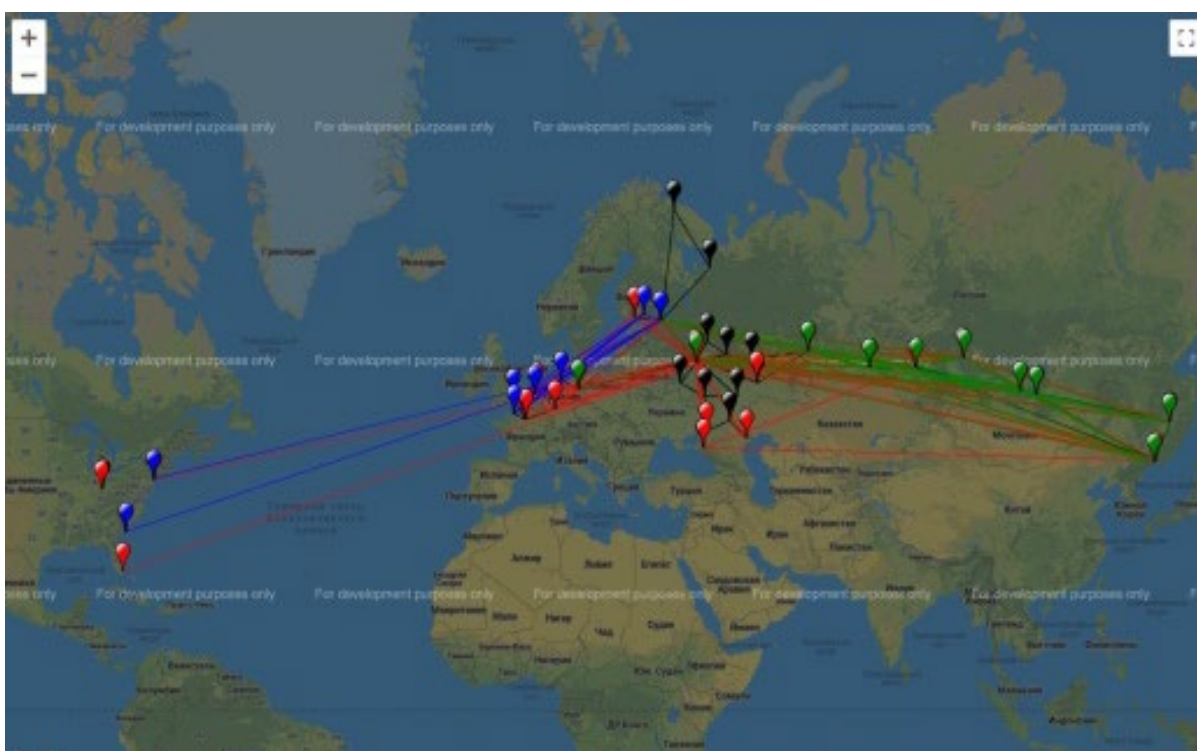


Fig. 4. Three international parts of the considerate logistic digital ecosystem

As result the transport terminals network in frame of the digital logistics ecosystem contains in total:

- 31 head distribution centers (n);
- 21 terminals of approach to aviation network (nav);
- 6 sea gateway distribution centers;
- 11 terminals of approach to the rail network (nRS).

**TRANSPORT TERMINALS NETWORK SCHEDULE AND RATES**

Road, air and rail transport routes can be described as below.

Let's enter array ScheDat  $[i, j]$ , which contains information about the routes interterminal transportation schedule, where  $i$  — is routing code in the schedule;  $j$  — is parameter routing.

Array ScheDat  $[i, j]$  consists of next variables:

- ScheDat  $[i, 1]$  are denote the code of departure from distribution center;
- ScheDat  $[i, 2]$  — destination code;
- ScheDat  $[i, 3]$  — code of the type of scheduling;
- ScheDat  $[i, 4]$  — the time of departure;
- ScheDat  $[i, 5]$  — transit time of route.

Let's enter next rules:

- all timing parameters are set in minutes;
- schedule is attached to the weekly cycle;
- schedule type means interterminal routes with different departure days of the week, for example: code 0 means the daily schedules of departure, code 1 — 6 days of departure (except Sunday), etc.

Fares (USD/kg) are given by the matrix of cost:  $C = C[i, j]$ , where diagonal elements are the rates for terminal handling in the  $i$ -th terminal, and the off-diagonal elements when  $i \neq j$  — interterminal rates for transportation.

A matrix of distances on roads (km) between nodes (hub and distribution centers of approach) of the network is also refers to the network. If the terminals are not connected by direct routes, the distance and the corresponding elements of cost matrix are equal to infinity.

EXAMPLES OF THE CALCULATIONS AND MODELLINGS

*L-optimal tariff and distance routing in frame of the digital logistics ecosystem*

Let's introduce the quantities:

$U_r^k[i]$  as a length of  $r$ -th shortest route,  $r = 1, 2, \dots, L$  from the  $i$ -th node to the fixed end node  $i_k$  of the network with numbers of intermediate nodes up to  $k$ .

Generic term «node», «length», «shortest route» are used in the general definitions here and throughout the article.

But the route length means its value (price, USD/kg) or distance (rally, km) in this section, and length means the time of delivery in the next section. When the route calculation parameter  $k = 0, 1, \dots, (n - 2)$ , it also has the meaning of the iteration number, where  $n$  is the total number of nodes. Values  $U_r^k[i]$  are defined by the following recursive equations:

$$U_r^k[i] = \min_r \{C[i, i] + C[i, j] + U_\mu^{(k-1)}[j]\}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

where  $\min_r$  is the  $r$ -th smallest ( $r$ -th minimum grade) set of numbers in curly brackets.

The set of numbers is formed by sorting of all nodes  $j \neq i$ , connected by arcs (interterminal routes) with the  $i$ -th node and the length of  $\mu$ 's shortest routes  $U_\mu^{(k-1)}[j]$  from node  $j$  to node  $i_k$ , what is calculated on the previous ( $k - 1$ )-th iteration.

The initial conditions for these equations are determined with  $k = 0$  by the expression:

$$U_r^0[i] = C[i, i_k] + C[i, i] + C[i_k, i_k], \quad r = 1.$$

When  $r \neq 1$ , or if the nodes  $i$  and  $i_k$  are not directly related arcs, the  $U_r^0[i]$  meanings are set equal to the infinity.

Computation of the  $L$ -optimal routes leading from a given initial node  $i_0$  to a fixed end node  $i_k$  is performed after the calculation of the target functions  $U_r^k[i]$  with  $k = (n - 2)$ .

The calculations are similar to the procedure described in [7]. Bust rank values  $r = 1, 2, \dots, L$  defines a family of  $L$ -optimal tariff routes.

$L$ -optimal by a minimum distance route are calculated by the algorithms, putting the cost of the matrix equal to the matrix of distances by road between terminals.  $L$ -optimal routes by tariffs and distance (as opposed to the optimal time) do not depend on ScheduleData of the network, the time and day of cargo arrival at the departure terminal.

*Calculation of L-optimal time of delivery routes*

In case of the regular in terminal transportations what depend on parameters of the schedule and the arrival of the cargo to the original departure terminal algorithm of the search is complicated by the emergence of new variables.

Let's  $U_r^k[l, t, i]$  — the length of  $r$ -th shortest route,  $r = 1, 2, \dots, L$  (a minimum time of delivery) from the  $i$ -th terminal to the end terminal  $i_k$ , providing that the route contains no more  $k$  intermediate terminals, and cargo arrived to the  $i$ -th departure terminal at the time  $t$  days  $l$ -th day of the week,  $l = 1, 2, \dots, 7$ .

$T$  — discrete variable, what appeared as a result of the discretization of continuous time of the day with a step  $dt$ . There is  $dt = 10$  min, discrete time is set to 0, 1, ..., 144 in the program.

All the temporal characteristics of the transport terminals network (time of arrival at the terminal, departure, duration of the interterminal routes, and the meaning of function  $U_r^k[l, t, i]$ ) is measured in minutes.

Variables  $U_r^k[l, t, i]$  are related by the equations:

$$U_r^k[l, t, i] = \min_r \{T[l, t, i, j] + U_\mu^{(k-1)}[l_j, t_j, j]\}, \quad (2)$$

where  $T[l, t, i, j]$  — time of the cargo delivery from the  $i$ -th to the  $j$ -th terminal, by a schedule what is determined by the regular service, provided that the cargo have arrived to the  $i$ -th terminal with arrival parameters  $(l, t)$ .

If there is no direct flight between the  $i$ -th and  $j$ -th nodes in the, this value is equal to infinity;  $l_j$  and  $t_j$  are day and the daily arrival time to the  $j$ -th terminal.

The parameter  $k = 1, \dots, (n - 2)$  has the same meaning as in the equation (1).

The initial conditions with  $k = 0$  for equations (2) have the form

$$U_r^0[l, t, i] = T[l, t, i, i_k], \quad r = 1.$$

If  $r > 1$ , or there is no direct interterminal flights between the  $i$ -th and  $j$ -th points, the values of the functions  $U_r^0[l, t, i]$  are set equal to infinity.

Gasket  $L$ -optimal route by delivery time is the reverse motion procedure [7]. Time optimal routes depend on the day of the week and the time of cargo arrival to the departure terminal in contrast to the optimal tariff routes. In addition, the existence and uniqueness of the routes can be violated.

CONCLUSION

The problem what is considered in this article covers both the important modeling tasks, optimization of transport routes and freight flow calculation in freight terminal networks of multimodal transport operators and issues of creation and support of the digital logistics ecosystem as well. The use of  $L$ -optimal routes with different ranks and different criteria (minimum rates and delivery time) provides effective formal selecting routes mechanism, allowing to realize the full transport potential of intermodal transport terminal network. Manager who is working with the customer with the  $L$ -optimal routes in frame of the digital logistics ecosystem can offer the customer a range of a routes to suit the maximum extent hardly compatible requirements for cost and delivery time. Freight flow calculations for estimated values of the input flows, which express the expected traffic demands, can properly allocate handled cargo resources including vehicles on interterminal routes, drivers and loaders inside the terminals. All the proposed algorithms are implemented in the form of appropriate software and have been effective for considerate ecosystem of the multimodal freight terminal networks optimizing cargo delivering routes in time and allowing to freight operators to use joint data and technologies.

REFERENCES

1. Reinsel D., Gantz J., Rydning J. The Digitization of the World — From Edge to Core, *IDC Whitepaper*, No. US44413318, November 2018, 28 p. Available at: <http://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/idc-seagate-data-age-whitepaper.pdf> (accessed 10 Nov 2021).
2. Industry 4.0: Building the digital enterprise, 2016, 36 p. Available at: <http://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/>

landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf (accessed 10 Nov 2021).

3. Panetta K. 8 Dimensions of Business Ecosystems, *Gartner*. Published online at July 12, 2017. Available at: <http://www.gartner.com/smarterwithgartner/8-dimensions-of-business-ecosystems> (accessed 10 Nov 2021).

4. Technologies for Digital Ecosystems — Innovation Ecosystems Initiative. Available at: <http://www.digital-ecosystems.org> (accessed 10 Nov 2021).

5. Ruohomaa H., Kantola J., Salminen V. Value Network Development in Industry 4.0 Environment. In: *Kantola J. I., et al. (eds.) Advances in Human Factors, Business Management and Leadership (AHFE 2017): Proceedings of the International Conferences on Human Factors in Management and Leadership, and Business Management and Society, Los Angeles, CA, USA, July 17–21, 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 594. Cham, Springer International Publishing, 2017, Pp. 28–36.

DOI: 10.1007/978-3-319-60372-8\_4.

6. Bellman R. E., Glicksberg I. L., Gross O. A. Some aspects of the mathematical theory of control processes. Santa Monica, CA, RAND Corporation, 1958, 263 p.

7. Palagin Yu. I. Logistika i upravlenie materialnymi potokami: Uchebnoe posobie [Logistics and material flow management: Study guide]. Saint Petersburg, Politekhnik Publishing House, 2009, 286 p. (In Russian)

8. Palagin Yu. I. Optimalnoe planirovanie zadach zavoza i vyvoza gruzov iz neskol'kikh raspredelitel'nykh tsentrov [Optimal Planning of Tasks of Bringing Cargo In and Out of Several Distribution Centers, *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informatsionnyy sbornik [Transport: Science, Equipment, Management. Scientific Information Collection]*, 2010, No. 2, Pp. 12–15. (In Russian)

9. Palagin Y. I., Mochalov A. I. Modelirovanie i optimalnoe planirovanie dostavki gruzov v transportno-terminalnykh setyakh operatorov multimodalnykh perevozok [The Delivery Cargo Simulation and Optimal Planning in Transport-Terminal Networks of Multimodal Transport Operators], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii [Vestnik of St. Petersburg State University of Civil Aviation]*, 2012, No. 1 (3), Pp. 63–71. (In Russian)

# Логистическая цифровая экосистема сети мультимодальных грузовых терминалов

к.т.н. А. И. Мочалов, д.т.н. Ю. И. Палагин  
Санкт-Петербургский университет  
гражданской авиации  
Санкт-Петербург, Россия  
mai\_d@mail.ru, profypal@yandex.ru

к.т.н. Н. В. Иванова  
Петербургский государственный  
университет путей сообщения  
Императора Александра I  
Санкт-Петербург, Россия  
nataliv62@gmail.com

доктор философии Х. Руохомаа  
Университет прикладных наук  
Хямеэнлинна (НАМК)  
Хямеэнлинна, Финляндия  
heikki.ruohomaa@hamk.fi

**Аннотация.** Процессы цифровизации, увеличение объема данных (и больших данных), в следствие развития технологий, подтолкнули людей и бизнес к четвертой промышленной трансформации. Эти события привели к изменению некоторых бизнес-процессов в области транспортной логистики за счет более четкой оценки и оптимизации эффективности всей цепочки формирования стоимости. В статье рассматривается переход к экосистемному развитию путем сочетания математических моделей, алгоритмов маршрутизации и алгоритмов расчетов грузопотоков в транспортно-терминальных автомобильно-воздушно-морских-железнодорожных сетях операторов мультимодальных перевозок с виртуальными сервисами в период трансформации.

**Ключевые слова:** экосистемы, цифровые мультимодальные грузовые операторы, экосистема транспортно-терминальных сетей, оптимальная маршрутизация доставки, терминальные виртуальные сервисы, планирование, алгоритмы, цифровизация.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Reinsel, D. The Digitization of the World — From Edge to Core / D. Reinsel, J. Gantz, J. Rydning // IDC Whitepaper. No. US44413318. November 2018. 28 p. URL: <http://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/idc-seagate-data-age-whitepaper.pdf> (дата обращения 10.11.2021).
2. Industry 4.0: Building the digital enterprise. 2016. 36 p. URL: <http://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf> (дата обращения 10.11.2021).
3. Panetta, K. 8 Dimensions of Business Ecosystems. — 2017. — 12 July // Gartner. URL: <http://www.gartner.com/smarterwithgartner/8-dimensions-of-business-ecosystems> (дата обращения 10.11.2021).
4. Technologies for Digital Ecosystems — Innovation Ecosystems Initiative. URL: <http://www.digital-ecosystems.org> (дата обращения 10.11.2021).

5. Ruohomaa, H. Value Network Development in Industry 4.0 Environment / H. Ruohomaa, J. Kantola, V. Salminen // Advances in Human Factors, Business Management and Leadership (AHFE 2017): Proceedings of the International Conferences on Human Factors in Management and Leadership, and Business Management and Society (Los Angeles, CA, USA, 17–21 July, 2017) / J. I. Kantola, [et al.] (eds.) — Cham: Springer International Publishing, 2017. — Pp. 28–36. — (Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 594). DOI: 10.1007/978-3-319-60372-8\_4.

6. Bellman, R. E. Some aspects of the mathematical theory of control processes / R. E. Bellman, I. L. Glicksberg, O. A. Gross. — Santa Monica (CA): RAND Corporation, 1958. — 263 p.

7. Палагин, Ю. И. Логистика и управление материальными потоками: Учебное пособие. — Санкт-Петербург: Политехника, 2009. — 286 с. — (Учебное пособие для вузов).

8. Палагин, Ю. И. Оптимальное планирование задач завоза и вывоза грузов из нескольких распределительных центров // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2010. № 2. С. 12–15.

9. Палагин, Ю. И. Моделирование и оптимальное планирование доставки грузов в транспортно-терминальных сетях операторов мультимодальных перевозок / Ю. И. Палагин, А. И. Мочалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2012. № 1 (3). С. 63–71.

# Improving the Reliability of Electronic Elements Based on Volumetric Redundancy

Grand PhD V. A. Smagin  
International Informatization Academy  
Saint Petersburg, Russia  
va\_smagin@mail.ru

Grand PhD V. P. Bubnov, D. V. Barausov  
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
Saint Petersburg, Russia  
bubnov1950@yandex.ru, daniil\_bar95@mail.ru

**Abstract.** One of the possible methods of increasing the reliability of electronic elements based on volumetric redundancy is considered. A further study of the Shannon bridge from the standpoint of probability theory has been carried out. The construction of examples of some more complex bridge structures of elements is proposed. They can be the basis for building more complex systems with a large number of states. In the context of the development of nanotechnology, the principles of building systems down and up are applicable.

**Keywords:** redundancy, element self-restoration, Shannon bridge, Shannon elements, probability of working capacity, reliability structure of Sedyakin.

## INTRODUCTION

The purpose of the article is an in-depth study of the properties of known hardware redundancy in the context of the introduction of the concept of nanotechnology at the present time and obtaining new additional information in this regard [1, 2].

Primarily we will be interested in examples of redundancy that can recover itself when its individual elements fail. In our opinion, one of the first examples of such redundancy is the bridge of C. E. Shannon [3].

In the development of information theory. This element is characterized by the fact that it contains the fifth unloaded element. If one of the main four values of the elements fails, this diagonally positioned element automatically turns on, taking over part of the energy load, helping other elements to reduce its value. It is known that elements can fail for reasons of their breakage or the electrical short, leading to various functional or parametric properties of the entire bridge [4].

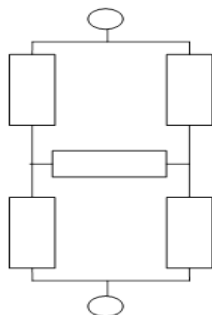


Fig. 1. Schematic diagram of the Shannon bridge

Assume that all elements of the bridge have only one type of failure — breakage. We consider the bridge to be operational only in two cases: when it does not have a single failure or one failure of a functional element out of four occurred in it, the diagonal element started working, taking over part of the load. In this case, the parametric side is not taken into account.

Simply put, the bridge is operable with the assumption of no more than one failure. The problem of calculating reliability is solved when these two hypotheses are fulfilled. The question is what effect in the reliability of the bridge is obtained when the diagonal element is included in the work. We will accept the following initial data with a normal distribution of elements for calculation:  $m = 50$  h,  $\sigma = 10$  h,  $f(t) = \text{dnorm}(t, m, \sigma)$ . Then the probability of failure-free element:

$$P(t) = \int_t^\infty f(z) dz,$$

and the resource of its reliability in the sense of N. M. Sedyakin [3–5].

Will be equal to  $r(t) = -\ln(P(t))$ . Graphs in Figures 2–4 illustrate expressions for the density, probability, and reliability resource of an element.

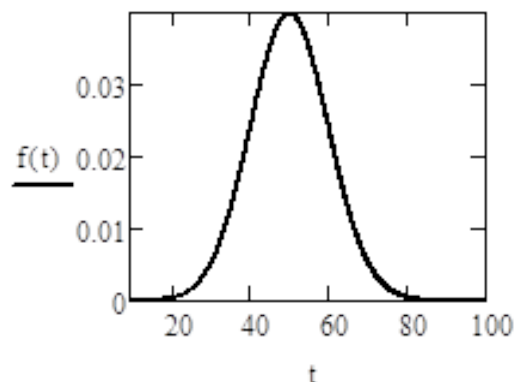


Fig. 2. Probability density of failure-free operation of the Shannon bridge

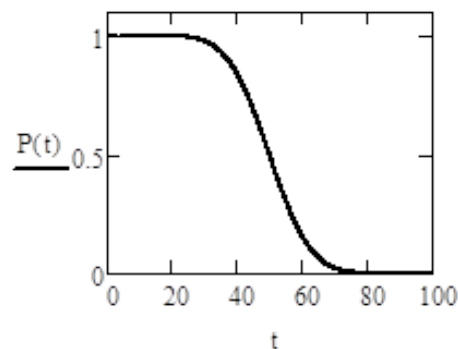


Fig. 3. Probability of failure-free operation of the Shannon bridge



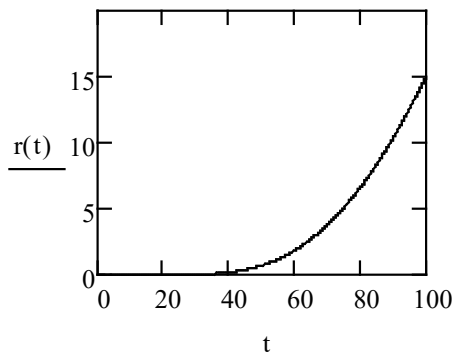


Fig. 4. Element reliability resource

*Failure is a breakage of an element in the bridge*

Figure 5 shows the breakage scheme of the element in the bridge. In the absence of a breakage, the serviceability of the bridge (hypothesis 1) is equal to

$$P_1(t) = (P(t))^4.$$

Breakage (hypothesis 2), diagonal element is not included,

$$4 \times (P(t))^3 \times (1 - P(t)).$$

The reliability resources are equal at the same time:

$$r_1(t) = -\ln(P_1(t)), \quad r_2(t) = -\ln(P_2(t)).$$

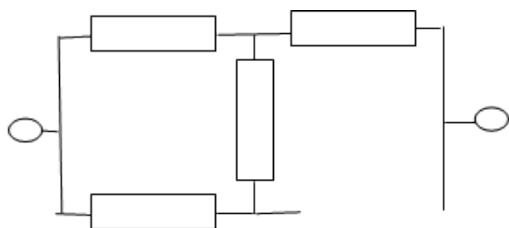


Fig. 5. The failure is a breakage scheme of the element in the bridge

The resulting probability of bridge serviceability when the sum of the two hypotheses is fulfilled, taking into account the inclusion of a diagonal element under the load, will be determined by the sum:

$$P_3(t) = P_1(t) + \int_0^t a_1(\tau) \times \frac{(P(t + \tau))^3 \times P(t - \tau)}{P_2(\tau)} d\tau, \quad (1)$$

where  $a_1(\tau) = -d/dt P_1(t)$  is the probability density of failure of one working element.

The reliability resource for (1) is defined as

$$\hat{r}_3(t) = -\ln(P_3(t)),$$

and the reliability resource of a workable bridge will be equal to

$$r_{13}(t) = r_1(t) + \hat{r}_3(t).$$

Figure 6 shows the graphical dependence of the values of the reliability resource of N. M. Sedyakin for the bridge circuit in the absence of an element failure in it by breakage, and Figure 7 shows the comparative dependences of the values of the bridge operability resources in the absence and presence of a failure by breakage.

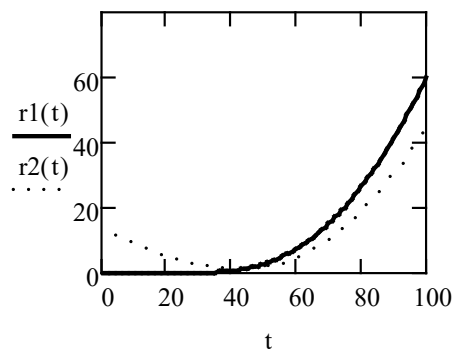


Fig. 6. Graphical dependence of the values of the reliability resource of N. M. Sedyakin for a bridge circuit in the absence of the element failure in it by breakage

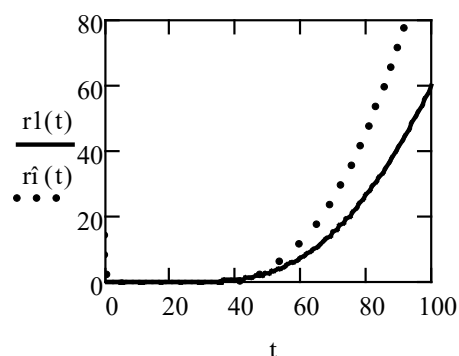


Fig. 7. Comparative dependences of values of the bridge operability resources in the absence and presence of a breakage failure

The dotted curve characterizes the contribution to the reliability of the bridge of the inclusion of a diagonal element in the form of an additional reliability resource in the form of an additional resource of N. M. Sedyakin, distributed over the remaining operable elements of the Shannon Bridge.

At the same time, the longer the bridge operation time, the greater the contribution value.

*Failure is a short circuit of an element in the bridge*

In the absence of the short circuit, the serviceability of the bridge (hypothesis 1) is equal to

$$P_1(t) = (P(t))^4.$$

Hypothesis 2 (the short circuit), its serviceability will be equal to

$$4 \times (P(t))^3 \times (1 - P(t)).$$

The reliability resources under these hypotheses are equal to

$$r_1(t) = -\ln(P_1(t)), \quad r_2(t) = -\ln(P_2(t)).$$

The short circuit scheme is shown in Figure 8.

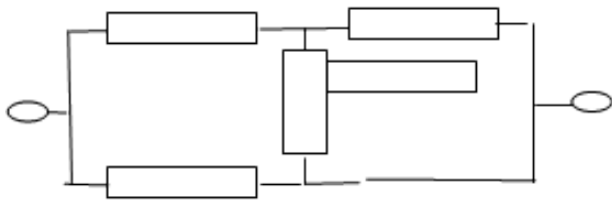


Fig. 8. The failure scheme is a short circuit of the element in the bridge

We make the assumption that the failures of breakage and short circuit in the cases considered here are equivalent.

The resulting probability of bridge serviceability when the sum of the two hypotheses is fulfilled, and in this case, taking into account the inclusion of a diagonal element under the load, will be determined by the sum (1), but the semantic content of this formula will be different. However, the parametric parameters of these two schemes in case of failures and short circuits will be different, which should be borne in mind. In this case, the result from the inclusion of a diagonal element in the work in both cases will be the same and it is determined by the formula (1) and Figures 6 and 7. Only the index elements will be different.

*Shannon Bridge made of Shannon bridge elements*

**Remark.** As for the bridge studies, when elements have two types of failures, breakage or closure of elements, and the output parametric properties of the bridge are determined by breakage or closure and the properties of its operability as a whole, such results have been already obtained and are well known from textbooks or lectures given in universities.

A CUBE OF SHANNON BRIDGES

In the same case, when bridges are considered as elements of complex redundant structures, such studies of structures from elementary bridges have been carried out quite a few, in our opinion. For example, the author of this work published an article quite a long time ago [1].

It considered a cube consisting of elements of edges carrying an electrical or other load. It contains six flat faces; diagonal elements are included in these faces of the cube, which do not carry any load with a fully functional cube. Therefore, each such facet represents a Shannon bridge. The diagonal element of any bridge can carry the load only if any element of the bridge carrying the load, fails. Thus, the cube consists of 12 main elements and 6 diagonal elements.

Analytically, in a closed form, the reliability and throughput of the cube have not been investigated even in the case when the edges of the cube are resistors, and the only one type of their failure is breakage. Such cube was built by a young engineer, the resistance value of the cube along its main diagonal was studied.

However, generalizing conclusions were not obtained. After all, even with one type of failure of a cube element,  $2^{18}$  states should be considered, and if the cube elements have two types of failures, breakage and closure, then the number of different states of the cube becomes  $3^{18}$ , so it becomes a very large number for research. Therefore, the method of statistical tests should be used to study the cube. However, judging by the publications in various sources of domestic and foreign publications, this was not observed. Only the author of the article has

qualitatively established the presence of harmonic oscillation of the main diagonal parameter, as well as its duration in time. This means that the long-term persistence in time of the value of the observed parameter of the main diagonal is inherent to the cube.

Based on this fact, it was concluded that for certain materials and achievements of modern industrial nanotechnology, for example, in the crystal structures of substance, as well as new scientific proposals, very highly reliable elements for long-term systems can be created.

THE MAJORITY SCHEME OF SHANNON BRIDGES

In a majority scheme, Shannon bridges can be independent or dependent on each other. In case of independence, calculations are performed in known ways. In the case of dependent elements, the calculation requires the construction of more complex models.

An example of a complex scheme with dependent Shannon bridges is a cube, which was described in the previous section, and more fully considered in the cited article [1].

Here, Figure 9 shows the simplest scheme and its probabilistic estimates for one and two types of element failures. With one type of failure, the expression for the probability of failure-free operation is represented as

$$P_{out}(t) = 3 \times p^2(t) - 2 \times p^3(t) ,$$

and for two types of failures of elements, (breakage and closure or failure of 0 and 1) in the form of

$$P_{out}(t) = 3 \times p^2(t) - 2 \times p^3(t) + 6 \times p(t) \times q_0(t) \times q_1(t).$$

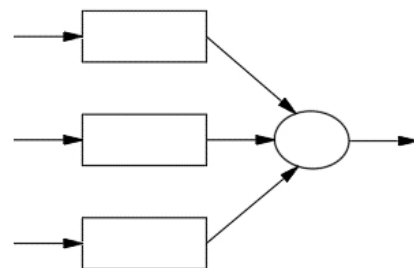


Fig. 9. Failure scheme is a short circuit of the element in the bridge

Figure 10 shows the probabilities of proper operation of one element, schemes of proper operation with one and two types of failures of their elements. Initial data:  $m = 100$  h,  $\sigma = 10$  h,  $a(t) = \text{dnorm}(t, m, \sigma)$ . The calculation is performed according to the formulas:

$$P(t) = \int_t^\infty a(z)dz, \quad Q(t) = \int_0^t a(z)dz,$$

$$Q_0(t) = 0.5 \times (1 - P(t)), \quad Q_1(t) = 0.5 \times (1 - P(t)),$$

$$PQ_1(t) = 3 \times (P(t))^2 - 2 \times (P(t))^3,$$

$$PQ_2(t) = 3 \times (P(t))^2 - 2 \times (P(t))^3 + 6 \times Q_0(t) \times Q_1(t) \times P(t).$$

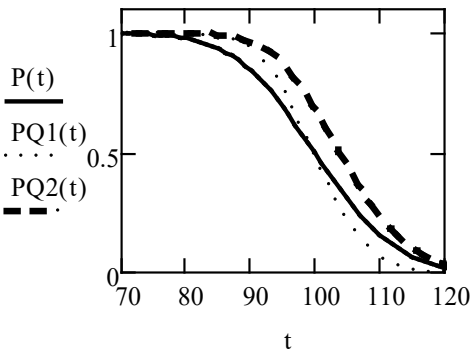


Fig. 10. The probability of proper operation of single-channel version of the scheme, a majority scheme with one or two types of failures

Figure 10 shows the probabilities of proper operation of a single-channel version of the scheme, a majority scheme with one and two types of failures, and in Figure 11, the unconditional and conditional probabilities of failures of one channel.

The majority scheme with two types of equally probable channel failures has the greatest probability. With one type of failure, it has the lowest probability.

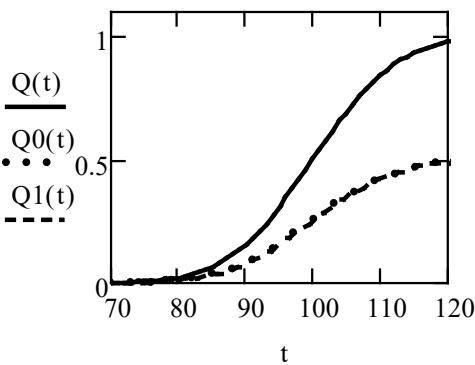


Fig. 11. Unconditional and conditional probabilities of failures of one channel

Figure 12 shows the values of the reliability resources of Professor N. M. Sedyakin. The single-channel and three-channel circuits have the greatest resource for two types of channel failures. The three-channel circuit with one type of channel failures has the smallest resource.

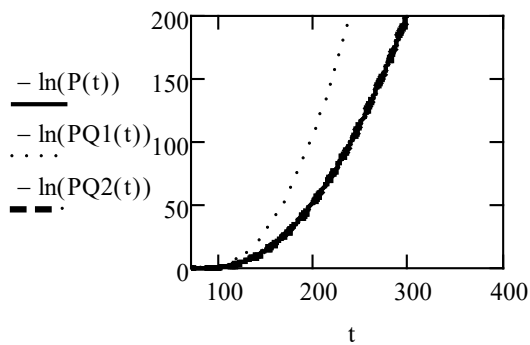


Fig. 12. Values of reliability resource Professor N. M. Sedyakin

An example of a majority scheme with dependent channels is a more complex structure in which the extreme channels of individual majority schemes are connected (dependent) with the channels of neighboring majority schemes.

**A model of the Shannon bridge chain.** Several bridges make up a sequentially triggered circuit in time. The first active bridge is in operation. It consists of four elements - the environment of existence, the fifth, diagonal element is not active as long as its external environment of four elements is in a balanced state, balanced.

At the moment when the balance of the environment is disturbed, the diagonal bridge is activated. The structure of this bridge is the same bridge as the first bridge, until the equilibrium balance is disturbed in it. Now it performs the role of a destroyed bridge until its balance is disturbed. If the balance of this bridge is disturbed, its diagonal bridge is activated. It performs the work until the moment of violation of its balance.

After a violation of the balance, its diagonal is included in the work — the next similarly balanced bridge. The work of the chain ends when the last bridge of the chain finishes its work. It is required to make a probabilistic model of the network functioning. Based on the section in which the model of a bridge with a breakage of an element of the medium is considered with its balanced state and an unloaded diagonal element, the probability of the initial state was equal to  $P_1(t) = (P(t))^4$ . And the probability of maintaining its operability, provided that this hypothesis is fulfilled and the hypothesis that the element of the environment has failed, and the diagonal element has assumed the function of maintaining the bridge's operability becomes equal to

$$PP_1(t) = P_1(t) + \int_0^t a(z) \times P(t - z) dz.$$

On condition that the bridge operability property continues to be maintained in the future when a new medium of four elements is balanced or when an element of this medium fails and goes into a working state due to the inclusion of a new diagonal element of the new bridge, the probability of continuing to remain operational continuously becomes equal:

$$PP_2(t) = P_1(t) + \int_0^t a(z) \times P_1(t - z) dz + \int_0^t b(z) \times PP_1(z) dz.$$

The probability densities of failures  $a(t)$  and  $b(t)$  by the following expressions:

$$a(t) = -\frac{d}{dt} P_1(t) \rightarrow 4 \times \left( \int_0^t \text{dnorm}(z, 50, 10) dz \right) \times \text{dnorm}(t, 50, 10);$$

$$b(t) = -\frac{d}{dt} PP_1(t) \tag{2}$$

Formula (2) is not disclosed here because of the rather large complexity. If the number of sequentially connected bridges in the circuit is more than three, then it is possible to make a recurrent dependence for calculating the parameters of a variable random process and, based on this calculation, evaluate more

accurately the quality of this process and the possibility of practical implementation and effectiveness of the considered type of redundancy. Based on the performed research, the following graphic material is presented for illustration in Figures 13–15.

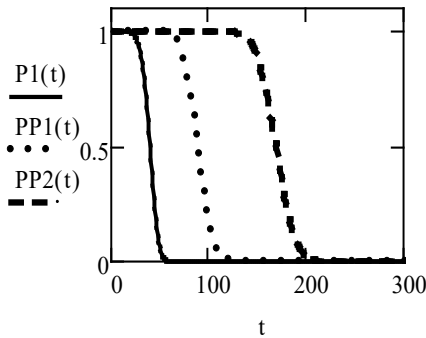


Fig. 13. The initial probability of bridge operability, the probability of operability after the first failure of the environment, and the probability of operability after the second failure of the bridge environment

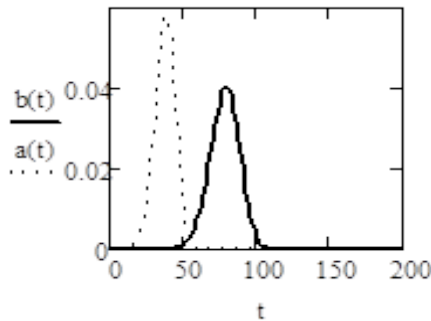


Fig. 14. The probability densities of the time of the first and second failures of the medium

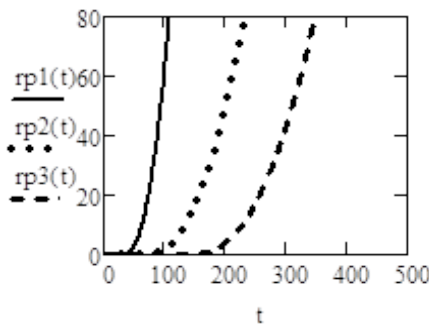


Fig. 15. Graphs of reliability resources by N. M. Sedyakin

Figure 13 shows the initial probability of bridge operability, the probability of operability after the first failure of the environment and the probability of operability after the second failure of the bridge medium. Figure 14 shows the probability densities of the time of the first and second failures of the medium. Figure 15 shows graphs of N. M. Sedyakin's reliability resources calculated using the formulas

$$rp_1(t) = -\ln(P_1(t)), \quad rp_2(t) = -\ln(PP_1(t)),$$

$$rp_3(t) = -\ln(PP_2(t)).$$

The graphs shown in Figures 13 and 15 indicate an increase in the efficiency effect of the circuit with an increase in the number of transitions performed in it. Figure 16 shows graphs of the probabilities of operability of the three stages of the chain using a majority redundancy scheme.

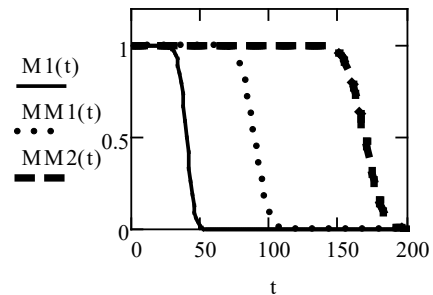


Fig. 16. Probabilities of operability of three stages of the chain using a majority redundancy scheme

**A three-dimensional bridge of three dependent simple Shannon bridges.** At the beginning of the article, we put a simple, primary structure of the Shannon bridge, which was associated with the book [6].

He also proposed a decomposition formula for the analytical calculation of the probability of executing the algorithm for the functioning of the bridge with known probabilities of all its elements.

The idea of a bridge was used in communication technology and game theory.

However, our goal is to study the structure of the bridge to assess the probability of its functioning under the condition that it is balanced, so to the failure of any one of the four elements with an unloaded diagonal element, and then take into account the influence of the latter on the final result.

An interesting fact is that when its medium of four elements has a goal to perform some task, then the fifth element is not needed. If the balance of the medium is disturbed, the fifth element begins to perform the task of supporting the environment in which it is located.

This property is inherent to the Shannon bridge. However, it is possible to build more complex structures that use the auxiliary role of the diagonal elements of the constituent bridges of these structures to solve the target tasks.

#### CONCLUSION

The idea of building a bridge by C. E. Shannon is widely applicable in the science and technology of measuring and controlling systems, game theory and decision-making. It can perform the function of monitoring the state in systems and serve as a system for maintaining a state of balance in them.

The article further studies the Shannon bridge from the standpoint of probability theory.

The construction of examples of some more complex bridge structures of elements is proposed. They can be the basis for building more complex systems with a large number of states. For now, the deep analysis of the properties of these elements has not been obtained.

#### REFERENCES

1. Smagin V. A. Nanotechnology — The Basis for the Creation of New High-Reliability Elements, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2008. Vol. 42, Is. 2. Pp. 109–111. DOI: 10.3103/S0146411608020090.

2. Smagin V. A. Novye voprosy teorii ekspluatatsii [New questions of the exploitation theory]. Saint Petersburg Mozhaisky Military Space Academy, 2010, 127 p. (In Russian)

3. Sedyakin N. M. Ob odnom fizicheskom printsipe teorii nadezhnosti i nekotorykh ego prilozheniyakh [About one physical principle of reliability theory and some of its applications]. Leningrad [Saint Petersburg], Mozhaisky Air Force Engineering Academy, 1965, 41 p. (In Russian)

4. Sedyakin N. M. Ob odnom fizicheskom printsipe teorii nadezhnosti [About One Physical Principle of Reliability

Theory], *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika [Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Technical Cybernetics]*, 1966, No. 3, Pp. 80–87. (In Russian)

5. Polovko A. M. Osnovy teorii nadezhnosti [Fundamentals of reliability theory]. Moscow, Nauka Publishers, 1964, 446 p.

6. Shannon C. E. Raboty po teorii informatsii i kibernetike [Works on information theory and cybernetics]. Moscow, Foreign Literature Publishing House, 1963, 829 p. (In Russian)

# Повышение надежности электронных элементов на основе объемного резервирования

д.т.н. В. А. Смагин  
Международная академия информатизации  
Санкт-Петербург, Россия  
va\_smagin@mail.ru

д.т.н. В. П. Бубнов, Д. В. Бараусов  
Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I  
Санкт-Петербург, Россия  
bubnov1950@yandex.ru, daniil\_bara95@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрен один из возможных методов повышения надежности электронных элементов, основанный на объемном резервировании. Проведено дальнейшее исследование моста Шеннона с точки зрения теории вероятностей. Предлагается построение примеров некоторых более сложных мостовых конструкций из элементов. Они могут стать основой для построения более сложных систем с большим количеством состояний. В контексте развития нанотехнологий применимы принципы построения систем снизу вверх.

**Ключевые слова:** избыточность, самовосстановление элемента, мост Шеннона, элементы Шеннона, вероятность работоспособности, структура надежности Седакина.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Smagin, V. A. Nanotechnology — The Basis for the Creation of New High-Reliability Elements // Automatic Control and Computer Sciences. 2008. Vol. 42, Is. 2. Pp. 109–111. DOI: 10.3103/S0146411608020090.
2. Смагин, В. А. Новые вопросы теории эксплуатации. — Санкт-Петербург: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2010. — 127 с.

3. Седакин, Н. М. Об одном физическом принципе теории надежности и некоторых его приложениях: Доклад в порядке дискуссии: Выступления по докладу. — Ленинград [Санкт-Петербург]: ЛВВИА им. А. Ф. Можайского, 1965. — 41 с.

4. Седакин, Н. М. Об одном физическом принципе теории надежности // Известия Академии наук СССР. Техническая кибернетика. 1966. № 3. С. 80–87.

5. Половко, А. М. Основы теории надежности. — Москва: Наука, 1964. — 446 с.

6. Шеннон, К. Э. Работы по теории информации и кибернетике: Сборник статей: Пер. с англ. / Под ред. Р. Л. Добрушина и О. Б. Лупанова. — Москва: Изд-во иностранной литературы, 1963. — 829 с.

# Mathematical Models for Software Development of Control Systems for Unmanned Vessels

Grand PhD S. S. Sokolov, G. V. Danilin, PhD T. P. Knysh  
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
Saint Petersburg, Russia  
sokolovss@gumrf.ru, t.101@mail.ru, KnyshTP@gumrf.ru

**Abstract.** Unmanned navigation is a direction in the field of water transport, which is based on the idea of operating unmanned vessels. Despite the fact that the world's first model of an unmanned vehicle was the model of a remotely operated vessel shown by Nikola Tesla in 1899, for a long time humanity's interest in unmanned vessels was much lower than in unmanned aerial vehicles, since they found use in the military industry faster, and cars that would potentially have greater consumer demand, and accordingly, projects that would be commercially successful and quickly recouped. However, in recent decades, in the field of water transport, a tendency to reduce the number of ship crews has emerged and continues to develop to this day, based on the desire to reduce the influence of the «human factor» on the accident rate of navigation. In addition to improving the safety of navigation, it is expected that with the transition to unmanned navigation, the useful capacity of ships will increase and operating costs will decrease. In this regard, interest in unmanned vessels has increased and it has become necessary to develop software for their control systems, and for this, in turn, appropriate mathematical and algorithmic support is required. In this work, at the first stage, the concept of an unmanned vessel will be studied, the classification of the degree of autonomy of vessels will be considered, and the structural diagrams of control systems of unmanned vessels with remote control and autonomous unmanned vessels will be familiarized. At the second stage, the features characteristic of most mathematical models of ship movement described in the literature today will be studied first, and then systems of equations describing the movement of a ship in deep water and in shallow water will be considered.

**Keywords:** water transport, automation, control system, unmanned vessel, mathematical modeling, block diagram.

## INTRODUCTION

Unmanned navigation is a direction in the field of water transport, which is based on the idea of operating unmanned vessels [1]. Despite the fact that the world's first model of an unmanned vehicle was the model of a remotely operated vessel shown by Nikola Tesla in 1899, for a long time humanity's interest in unmanned vessels was much lower than in unmanned aerial vehicles, since they found use in the military industry faster, and cars that would potentially have greater consumer demand, and accordingly, projects that would be commercially successful and quickly recouped. However, in recent decades, in the field of water transport, a tendency to reduce the number of ship crews has emerged and continues to develop to this day, based on the desire to reduce the influence of the «human factor» on the accident rate of navigation. In addition to improving the safety of navigation, it is expected that with the transition to unmanned navigation, the useful capacity of ships will increase and operating costs will decrease. In this regard, there has been an increased interest in unmanned vessels.

## TYPES OF UNMANNED VESSELS

The International Maritime Organization (IMO) has assigned the abbreviation MASS to unmanned vessels (from the English *Maritime Autonomous Surface Ships* — marine autonomous surface vessels). According to the definition given by IMO in May 2018, an unmanned vessel (MASS) is a vessel that, to one degree or another, can function independently of human involvement. At the same time, a classification of the degree of autonomy of vessels was proposed:

- a vessel with automated processes and decision support, on board of which there is a crew to activate and control on-board systems and functions;
- remotely operated vessel with crew;
- remotely operated vessel without crew;
- a fully autonomous vessel, the onboard control system of which is capable of independently making decisions and determining the order of actions.

Currently, the last two classes of vessels are of the greatest interest to researchers and designers [2–4]. Since today there is no single approach to the design of unmanned vessels, the creation of projects of vessels of the same and second class has been allocated in two parallel directions.

The most significant difference between vessels from different classes is the construction of their control systems. Not a small number of domestic and foreign scientists have been engaged in the development of ship control systems [3, 5–8], however, there is still no unified approach to the creation of control systems for an unmanned vessel. At the moment, most of the developments in this area belong to private organizations seeking to preserve trade secrets and developing their systems closed, and the control systems themselves are created for specific technical characteristics of specific samples. The vision of how the structure of the control system of a remote-controlled unmanned vessel (Figure 1) and the structure of the control system of a fully autonomous unmanned vessel (Figure 2) should look like is presented in several scientific publications [2, 4].

It is likely that vessels of both classes will be equally widespread in the future for a certain period of time, but they will be focused on performing different tasks: fully autonomous vessels will make long-distance sea crossings, and their wiring through straits, channels and rivers, as well as assistance in performing maneuvers in the port, will probably be carried out using remotely controlled unmanned vessels. However, gradually fully autonomous vessels are likely to prevail. This should be facilitated by the development of mathematical and algorithmic support.

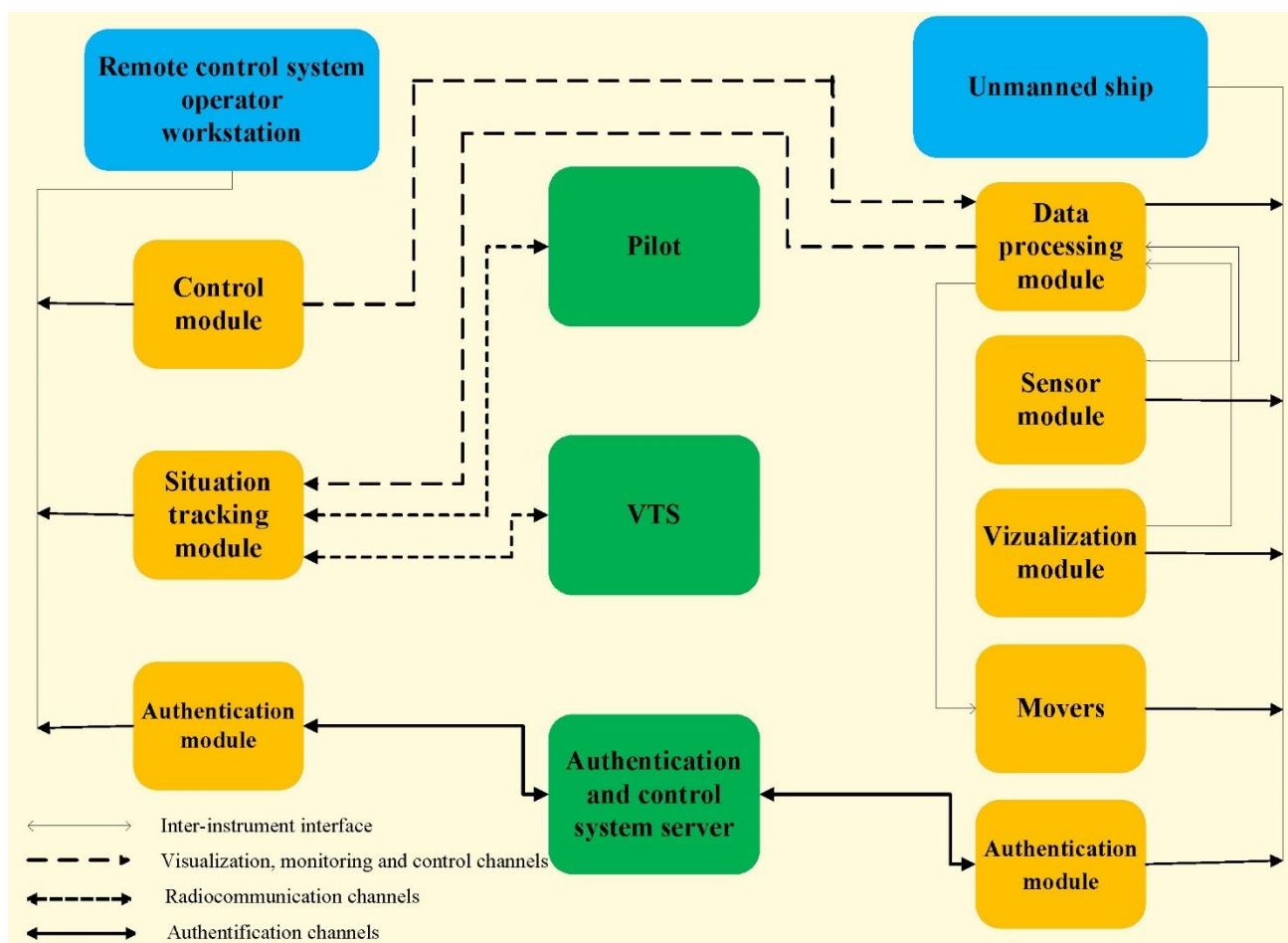


Fig. 1. Structure of the control system of an unmanned vessel with remote control

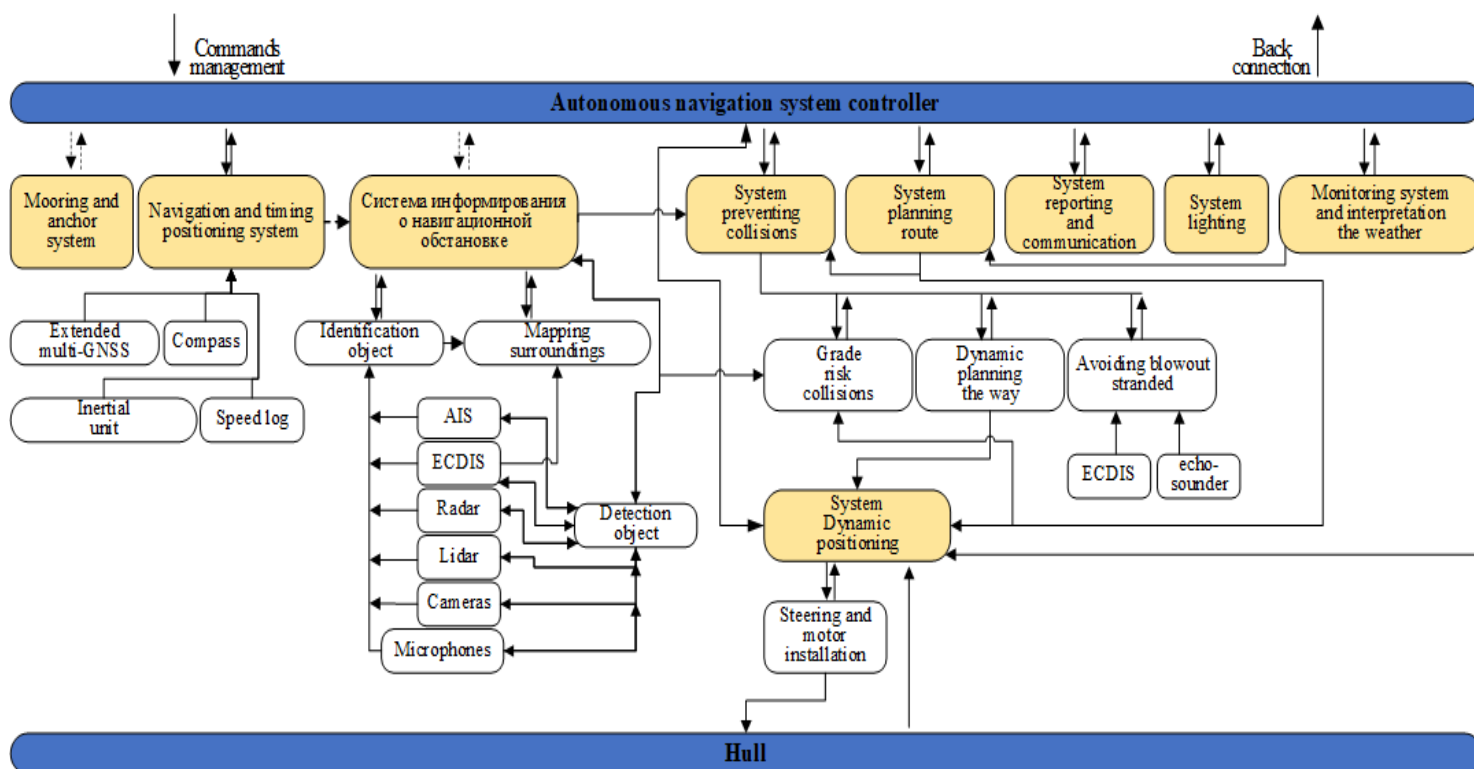


Fig. 2. Structure of the control system of an autonomous unmanned vessel



It can be seen from the figures that the structure of the control system of an autonomous unmanned vessel is more complex and contains a larger number of subsystems. Appropriate mathematical and algorithmic support is critically important for the creation of an autonomous vessel control system.

RC SPORTS MODELS & TOYS ABOUT MATHEMATICAL MODELS OF SHIP MOVEMENT

To date, a number of mathematical models of ship movement have been described in the literature [9], which combine the following:

1. All these models are special cases of a mathematical model of controlled motion of a rigid solid.
2. All models allow you to calculate the trajectory of the vessel under specified conditions.
3. Each state of the vessel  $S(t)$  considered in the model is a set of 3 spatial coordinates of its center of mass and 3 angles describing the kinematic position of the vessel: roll, trim and yaw.
4. A significant part of the models neglects the change in the draft of the vessel, the angles of its roll and trim, due to their slight change, and is reduced to considering the plane-parallel movement of the vessel in the horizontal plane, that is, characterizes the state of the vessel  $S(t)$  with only three parameters: coordinates  $x_0$  and  $y_0$  with respect to the fixed coordinate system and the heading angle  $q$ , that is

$$S(t) = (x_0(t), y_0(t), q(t)). \quad (1)$$

5. Models are continuous, the number of ship states  $S(t)$  in them is finite.
6. Models are described, as a rule, by a system of 3 differential equations of the 2nd order:

$$\frac{d^2 S}{dt^2} = F \left( t, C, \frac{dS}{dt}, S(t), U(t), L(t), E(t) \right),$$

where  $C$  is a vector that includes the linear dimensions of the vessel, its areas and volumes, as well as the technical characteristics of its controls;  $U(t)$  are control actions, such as the

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 x_0}{dt^2} &= \sum_i F_{x_{0i}} \left( t, C, \frac{dx_0}{dt}, \frac{dy_0}{dt}, \frac{dq}{dt}, x_0(t), y_0(t), q(t), U(t), L(t), E(t) \right) / m \\ \frac{d^2 y_0}{dt^2} &= \sum_i F_{y_{0i}} \left( t, C, \frac{dx_0}{dt}, \frac{dy_0}{dt}, \frac{dq}{dt}, x_0(t), y_0(t), q(t), U(t), L(t), E(t) \right) / m \\ \frac{d^2 q}{dt^2} &= \sum_i M_i \left( t, C, \frac{dx_0}{dt}, \frac{dy_0}{dt}, \frac{dq}{dt}, x_0(t), y_0(t), q(t), U(t), L(t), E(t) \right) / I_z \end{aligned} \right\}.$$

But a significant part of the authors use equations not with respect to coordinates and heading angle, but with respect to their derivatives — linear velocity  $v$ , angular velocity  $w$  and drift angle  $\beta$ .

After conducting a critical analysis of a number of mathematical models of ship movement, it can be concluded that today there is no ideal mathematical model of ship movement that would provide acceptable accuracy in calculating the kinematic parameters of all maneuvers performed by the ship, as there is no universal model suitable for describing not one specific, but any vessel. This currently imposes certain restrictions on the development of control systems for fully autonomous vessels. It turns out that when creating a new model

angle of the rudder shift  $\delta_R(t)$ , the rotation speed of the propeller  $n_m(t)$ , its pitch ratio  $H/D(t)$  and the position of the thruster regulator  $N_{TRrel}(t)$ , which sets the percentage of power relative to the maximum;  $L(t)$  are load parameters, such as the masses and coordinates of the cargo on board the vessel;  $E(t)$  — external disturbing influences — the depths at each point of the water area, the directions of winds and currents together with their velocities, the amplitude and phase spectrum of waves together with the spectrum of wave propagation directions at all frequencies for each point of the water area at any given time.

7. All mathematical models described in the literature can be divided into 2 types: the first type describes the movement of one particular vessel, expressed, most often, by a system of differential equations with fixed coefficients determined by the selection method when comparing the simulation results with the experimental results. Such models are suitable only for highly specialized research and the creation of navigation simulators for specified types of vessels. The second type of models describes the movement of ships belonging to a certain class. In models of this type, the systematization of experimental results is carried out on a sample of vessels, so they make it possible not only to calculate the movement of the vessel in certain navigation conditions, but also to calculate how its measurable parameters will affect the behavior of the vessel. Such models are called semi-empirical. They are usually expressed through a system of differential equations and a set of formulas, tables and graphs necessary to calculate the coefficients of these equations. There are no purely theoretical models to date.

8. For the vast majority of mathematical models described in the literature, empirical data were obtained during model experiments with mock-ups of ships, and not with real ships, which means that the scale coefficients used in the calculations introduce additional errors into the models.

Equation (1), suitable for describing any existing mathematical model today, can be written in more detail:

of a basecoaching vessel, it is necessary to select and adapt the most suitable mathematical model specifically for it, and to ensure that this vessel can operate in different navigation conditions, it may even be worthwhile to provide in its control system the possibility of performing calculations on several models, switching between which will be carried out depending on the readings of external sensors and sensors transmitting information about the environment.

For example, when a vessel is moving through deep water [10], the equations of motion of the vessel look like:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{V}}{d\tau} &= \left[ \frac{m_{26}}{M} \bar{C}_m \sin \beta - \frac{m_{66}}{M} \bar{C}_y \sin \beta - \frac{1}{m_{11}} \bar{C}_x \cos \beta \right] \bar{V}^2 \\ \frac{d\beta}{d\tau} &= \left[ \frac{m_{26}}{M} \bar{C}_m \cos \beta - \frac{m_{66}}{M} \bar{C}_y \cos \beta - \frac{1}{m_{11}} \bar{C}_x \sin \beta \right] s\bar{V} \\ \frac{d\bar{\omega}}{d\tau} &= \left[ \frac{m_{26}}{M} \bar{C}_m - \frac{m_{66}}{M} \bar{C}_y \right] \bar{V}^2 \end{aligned} \right\},$$

where

$$\bar{C}_x = C_{x\Gamma} + \frac{\rho_1 S_y}{\rho L T} \bar{V}_k^{-2} C_{x_a} + \bar{m}\bar{\omega} \sin \beta - x(1 - \psi')^2 \frac{F_p}{L T} \sigma_e (1 - t') k_v^2;$$

$$\bar{C}_y = C_{y\Gamma} + \frac{\rho_1 S_y}{\rho L T} \bar{V}_k^{-2} C_{y_a} + \bar{m}\bar{\omega} \cos \beta - x(1 - \psi')^2 \frac{F_p}{L T} k_p \sigma_y k_v^2;$$

$$\bar{C}_m = C_{m\Gamma} + \frac{\rho_1 S_y}{\rho L T} \bar{V}_k^{-2} C_{m_a} - x(1 - \psi')^2 \frac{F_p}{L T} k_p k_\varepsilon \bar{l}_p \sigma_y k_v^2;$$

$$\bar{M} = m_{22} m_{66} - m_{26}^2;$$

$\bar{V}$  is the linear (reduced) speed of the vessel,  $\bar{V} = V/V_0$ ;

$V$  — the current value of the linear speed of the vessel;

$V_0$  — initial value of the ship's linear velocity;

$\beta$  — drift angle;

$\bar{\omega}$  — is the dimensionless angular velocity of the vessel,  $\bar{\omega} = \Omega L/V_0$ ;

$L$  — is the length of the vessel;

$\Omega$  — is the angular velocity of the vessel;

$m_{11}, m_{22}, m_{66}$  — are dimensionless hydrodynamic coefficients;

$\tau$  — is dimensionless time,  $\tau = V_0/L$ ;

$\bar{l}_p$  — dimensionless steering arm,  $\bar{l}_p = l_p/L$ ;

$l_p$  — distance of the rudder baller from the center of gravity of the vessel;

$C_{x\Gamma}, C_{y\Gamma}, C_{m\Gamma}, C_{x_a}, C_{y_a}, C_{m_a}, \sigma_e, \sigma_y, t', \psi'$  — complex nonlinear functions of the desired parameters  $\bar{V}, \bar{\omega}, \beta$ ;

$X_\Gamma, Y_\Gamma, M_\Gamma$  — experimentally determined hydrodynamic forces;

$C_{x\Gamma}, C_{y\Gamma}, C_{m\Gamma}$  — dimensionless coefficients of experimentally determined hydrodynamic forces;

$C_{x_a}, C_{y_a}, C_{m_a}$  — dimensionless coefficients of aerodynamic forces;

$\sigma_y$  — dimensionless coefficient of transverse force;

$\sigma_e$  — dimensionless coefficient of thrust;

$\psi'$  — the coefficient of the associated flow;

$t'$  — is the suction coefficient for curved motion;

$F_p$  — hydraulic section of the propulsion and steering complex;

$k_v$  — is the coefficient characterizing the change in speed in the area of the complex compared to the speed in the center of gravity of the vessel;

$k_\varepsilon$  — is the coefficient of displacement of the point of application of the transverse force of the propulsion and steering complex during its operation behind the hull;

$\rho$  — is the density of water;

$\rho_1$  — air density;

$S_y$  — sail area in the lateral projection of the vessel;

$V_k$  — wind speed relative to the vessel.

But in the case of vessel movement, for example, in shallow water, this mathematical model cannot be used without changes: the dynamic characteristics of the vessel in shallow water differ significantly from those in deep water. The resistance to the movement of the vessel in deep water is less, and the speed of the vessel at a constant speed of rotation of the propellers is higher. The system of equations describing the effect of shallow water on the hydrodynamics of the vessel is as follows:

$$\left. \begin{aligned} -C_{x\Gamma} - \bar{m}\bar{\omega} \sin \beta + x(1 - \psi') \frac{F_p}{L T} q_e \sigma_e \times (1 - t) k_v^2 &= 0 \\ C_{y\Gamma} - \bar{m}\bar{\omega} \cos \beta - x(1 - \psi')^2 \times \frac{F_p}{L T} k_p \sigma_y k_v^2 &= 0 \\ C_{m\Gamma} - x(1 - \psi')^2 \times \frac{F_p}{L T} k_p k_\varepsilon \bar{l}_p \sigma_y k_v^2 &= 0 \\ -k_\varepsilon \bar{l}_p C_{y\Gamma} + C_{m\Gamma} + k_\varepsilon \bar{l}_p \bar{m}\bar{\omega} \cos \beta &= 0 \end{aligned} \right\}.$$

In addition, there are studies that have revealed the influence of the ratio of the draft of the vessel to the depth, as well as other coefficients on the movement of the vessel in shallow water. Thanks to research of such a plan, as well as research in related fields [11–15], it is quite possible that in the near future it will be possible to create mathematical models of vessel movement in shallow water, suitable for their use in control systems on river autonomous unmanned vessels.

#### CONCLUSION

In this work, at the first stage, the concept of an unmanned vessel was studied, the classification of the degree of autonomy of vessels was considered, and the structural diagrams of control systems of unmanned vessels with remote control and autonomous unmanned vessels were familiarized. At the second stage, the features characteristic of most mathematical models of ship movement described in the literature today were first studied, and then systems of equations describing the movement of a ship in deep water and in shallow water were considered. In the course of the work, it was noted that today there is no sufficiently accurate mathematical model of ship movement suitable for describing the movement of any vessel in any navigation conditions. This currently imposes certain restrictions on the development of control systems for fully autonomous vessels.

#### REFERENCES

1. Keyless navigation, BES Unmanned sea vessels, *Tadviser — Government. Business. Technology*. Published online at September 24, 2020. Available at: [http://tadviser.com/index.php/Article:Keyless\\_navigation\\_BOE\\_\(Unmanned\\_Sea\\_Vessels\)](http://tadviser.com/index.php/Article:Keyless_navigation_BOE_(Unmanned_Sea_Vessels)) (accessed 10 Nov 2021).
2. Karetnikov V., Ol'khovik E., Ivanova A., Butsanets A. Technology Level and Development Trends of Autonomous Shipping Means, *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport (EMMFT 2019): Proceedings of the XXI International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies, Voronezh, Russia, December 10–13, 2019*. Cham, Springer Nature, 2020, Pp. 421–432. (Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 1258). DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5\_36.
3. Butsanets A. A. Organizatsiya sistemy distantsionnogo upravleniya bespilotnym tekhnicheskim flotom dlya

obespecheniya sudokhodstva na vnutrennikh vodnykh putyakh [Organization of a Remote Control System for Unmanned Technical Fleet to Ensure Navigation on Inland Waterways]: diss. on competition of a scientific degree PhD (Engin.). Saint Petersburg, 2021, 189 p. (In Russian)

4. Chaal M., Valdez Banda O. A., Glomsrud J. A., et al. A Framework to Model the STPA Hierarchical Control Structure of an Autonomous Ship, *Safety Science*, 2020, Vol. 132, Art. No. 104939, 15 p. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104939.

5. Nyrkov A. P., Sokolov S. S., Karpina A. S., et al. Cluster-Type Models in the Logistics Industry, *International Journal of Engineering and Technology*, 2018, Vol. 7, No. 1, Pp. 39–43. DOI: 10.14419/ijet.v7i1.8788.

6. Shipunov I. S., Nyrkov A. P., Ryabekov M. U., et al. The Concept of a Partially Unmanned Sea Convoy, *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, Saint Petersburg, Moscow, Russia, January 26–29, 2021. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021, Pp. 661–664. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396302.

7. Shipunov I. S., Nyrkov A. P., Katorin Yu. F., et al. On the Issue of Building Sea Convoys from Unmanned Ships, *Proceedings of the XXII International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies (EMMFT 2020)*, Voronezh, Russia, December 08–10, 2020. E3S Web of Conferences, 2021, Vol. 244, Art. No. 08013, 8 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202124408013.

8. Reshnyak V. I., Sokolov S. S., Nyrkov A. P., Budnik V. Yu. Inland Waterway Environmental Safety, *Proceedings of the 2018 International Conference Information Technologies in Business and Industry, Tomsk, Russia, January 18–20, 2018. Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1015, Is. 4, Art. No. 042049, 5 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/4/042049.

9. Yudin Yu. I., Sotnikov I. I. Matematicheskie modeli ploskoparallelnogo dvizheniya sudna. Klassifikatsiya i kriticheskiy analiz [Mathematical Models of the Vessel In-Plane Parallel Movement. Classification and Review], *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Vestnik of MSTU. Scientific Journal of Murmansk State Technical University]*, 2006, Vol. 9, No. 2, Pp. 200–208. (In Russian)

10. Abdullaeva Z. M. Razrabotka i realizatsiya matematicheskikh modeley dvizheniya sudna na melkovodye pri premennoy glubine [Development and Implementation of the Department of Mathematical Models of Vessel Movement in Shallow Water at Variable Depth]: diss. on competition of a scientific degree PhD (Engin.). Makhachkala, 2018, 270 p. (In Russian)

11. Nyrkov A. P., Glebov N. B., Novoselov R. O., et al. Databases Problems for Maritime Transport Industry on Platform Highload, *Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS): Proceedings of the 2018 IEEE International Conference, St. Petersburg, Russia, September 24–28, 2018*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018, Pp. 132–135. DOI: 10.1109/ITMQIS.2018.8525058.

12. Shipunov I. S., Voevodskiy K. S., Nyrkov A. P., et al. Trusted Transport Telemetry by Using Distributed Databases, *Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, Saint Petersburg, Moscow, Russia, January 28–31, 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019, Pp. 344–347. DOI: 10.1109/ElConRus.2019.8657215.

13. Shipunov I. S., Voevodskiy K. S., Nyrkov A. P., et al. About the Problems of Ensuring Information Security on Unmanned Ships, *Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, Saint Petersburg, Moscow, Russia, January 28–31, 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019, Pp. 339–343. DOI: 10.1109/ElConRus.2019.8657219.

14. Shipunov I. S., Nyrkov A. P., Kardakova M. V., et al. Information System for Monitoring and Analyzing the Technical Condition of Autonomous Vehicles, *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, Saint Petersburg, Moscow, Russia, January 27–30, 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020, Pp. 497–500. DOI: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039181.

15. Shipunov I. S., Nyrkov A. P., Ryabekov M. U., et al. Investigation of Computer Incidents as an Important Component in the Security of Maritime Transportation, *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, Saint Petersburg, Moscow, Russia, January 26–29, 2021. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021, Pp. 657–660. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396501.

# Построение математических моделей для разработки программного обеспечения систем управления безэкипажными судами

д.т.н. С. С. Соколов, Г. В. Данилин, к.ф.-м.н. Т. П. Кныш

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова  
Санкт-Петербург, Россия  
sokolovss@gumrf.ru, t.101@mail.ru, KnyshTP@gumrf.ru

**Аннотация.** Безэкипажная навигация — это направление в области водного транспорта, которое основывается на идеи управления безэкипажными судами. Несмотря на то, что первой в мире моделью дистанционно управляемого судна, показанная Николой Теслой в 1899 году, долгое время интерес человечества к безэкипажным судам был намного ниже, чем к беспилотным летательным аппаратам, поскольку они быстрее находили применение в военной промышленности, а автомобили, которые потенциально имели бы больший потребительский спрос и, соответственно, проекты, которые были бы коммерчески успешными и быстро окупались. Однако в последние десятилетия в сфере водного транспорта наметилась и продолжает развиваться по сей день тенденция к сокращению численности судовых экипажей, основанная на стремлении уменьшить влияние «человеческого фактора» на аварийность судоходства. Помимо повышения безопасности мореплавания, ожидается, что с переходом на безэкипажную навигацию увеличатся полезная вместимость судов и снизятся эксплуатационные расходы. В связи с этим возрос интерес к безэкипажным судам и возникла необходимость разработки программного обеспечения для их систем управления, а для этого, в свою очередь, требуется соответствующее математическое и алгоритмическое обеспечение. В представленной работе на первом этапе будет изучена концепция безэкипажного судна, рассмотрена классификация степени автономности судов, а также приведены структурные схемы систем управления безэкипажных судов с дистанционным управлением и автономных безэкипажных судов. На втором этапе сначала будут изучены особенности, характерные для большинства математических моделей движения судна, описанных сегодня в литературе, а затем будут рассмотрены системы уравнений, описывающие движение судна на большой глубине и на мелководье.

**Ключевые слова:** водный транспорт, автоматизация, система управления, безэкипажное судно, математическое моделирование, структурная схема.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Безэкипажное судовождение, БЭС (Беспилотные морские суда) // TAdviser — Государство. Бизнес. Технологии. — 2020. — 24 сентября.  
URL: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Безэкипажное\\_судовождение,\\_БЭС\\_\(Беспилотные\\_морские\\_суда\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Безэкипажное_судовождение,_БЭС_(Беспилотные_морские_суда)) (дата обращения 10.11.2021).
2. Technology Level and Development Trends of Autonomous Shipping Means / V. Karetnikov, E. Ol'khovik, A. Ivanova, A. Butsanets // Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport (EMMFT 2019): Proceedings of the XXI International Scientific Conference Ener-

gy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies (Voronezh, Russia, 10–13 December 2019). — Cham: Springer Nature, 2020. — Pp. 421–432. — (Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 1258).  
DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5\_36.

3. Буцанец, А. А. Организация системы дистанционного управления беспилотным техническим флотом для обеспечения судоходства на внутренних водных путях: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.22.19 / Буцанец Артем Александрович; Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — Санкт-Петербург, 2021. — 189 с.

4. A Framework to Model the STPA Hierarchical Control Structure of an Autonomous Ship / M. Chaal, O. A. Valdez Banda, J. A. Glomsrud, [et al.] // Safety Science. 2020. Vol. 132. Art. No. 104939. 15 p. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104939.

5. Cluster-Type Models in the Logistics Industry / A. P. Nyrkov, S. S. Sokolov, A. S. Karpina, [et al.] // International Journal of Engineering and Technology. 2018. Vol. 7, No. 1. Pp. 39–43. DOI: 10.14419/ijet.v7i1.8788.

6. The Concept of a Partially Unmanned Sea Convoy / I. S. Shipunov, A. P. Nyrkov, M. U. Ryabekov, [et al.] // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), (Saint Petersburg, Moscow, Russia, 26–29 January 2021). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021. — Pp. 661–664.  
DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396302.

7. On the Issue of Building Sea Convoys from Unmanned Ships / I. S. Shipunov, A. P. Nyrkov, Yu. F. Katorin, [et al.] // Proceedings of the XXII International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies (EMMFT 2020), (Voronezh, Russia, 08–10 December 2020). E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 244. Art. No. 08013. 8 p.  
DOI: 10.1051/e3sconf/202124408013.

8. Inland Waterway Environmental Safety / V. I. Reshnyak, S. S. Sokolov, A. P. Nyrkov, V. Yu. Budnik // Proceedings of the 2018 International Conference Information Technologies in Business and Industry (Tomsk, Russia, 18–20 January 2018). Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015, Is. 4. Art. No. 042049. 5 p.  
DOI: 10.1088/1742-6596/1015/4/042049.

9. Юдин, Ю. И. Математические модели плоскопараллельного движения судна. Классификация и критический анализ / Ю. И. Юдин, И. И. Сотников // Вестник МГТУ.

Труды Мурманского государственного технического университета. 2006. Т. 9, № 2. С. 200–208.

10. Абдуллаева, З. М. Разработка и реализация математических моделей движения судна на мелководье при переменной глубине: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.13.18 / Абдуллаева Залина Мусаевна; Дагестанский гос. техн. ун-т. — Махачкала, 2018. — 270 с.

11. Databases Problems for Maritime Transport Industry on Platform Highload / A. P. Nyrkov, N. B. Glebov, R. O. Novoselov, [et al.] // Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS): Proceedings of the 2018 IEEE International Conference (Saint Petersburg, Russia, 24–28 September 2018). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. — Pp. 132–135. DOI: 10.1109/ITMQIS.2018.8525058.

12. Trusted Transport Telemetry by Using Distributed Databases / I. S. Shipunov, K. S. Voevodskiy, A. P. Nyrkov, [et al.] // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), (Saint Petersburg, Moscow, Russia, 28–31 January 2019). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. — Pp. 344–347. DOI: 10.1109/ElConRus.2019.8657215.

13. About the Problems of Ensuring Information Security on Unmanned Ships / I. S. Shipunov, K. S. Voevodskiy, A. P. Nyrkov, [et al.] // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), (Saint Petersburg, Moscow, Russia, 28–31 January 2019). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. — Pp. 339–343. DOI: 10.1109/ElConRus.2019.8657219.

14. Information System for Monitoring and Analyzing the Technical Condition of Autonomous Vehicles / I. S. Shipunov, A. P. Nyrkov, M. V. Kardakova, [et al.] // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), (Saint Petersburg, Moscow, Russia, 27–30 January 2020). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020. — Pp. 497–500. DOI: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039181.

15. Investigation of Computer Incidents as an Important Component in the Security of Maritime Transportation / I. S. Shipunov, A. P. Nyrkov, M. U. Ryabekov, [et al.] // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), (Saint Petersburg, Moscow, Russia, 26–29 January 2021). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021. — Pp. 657–660. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396501.

# Neurointerface Modeling for Controlling Dynamic Systems

Yu. V. Tsymay, Grand PhD A. P. Nyrkov, M. V. Kardakova  
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
Saint Petersburg, Russia  
m-walua@yandex.ru, apnyrkow@mail.ru, m.v.kardakova@ya.ru

**Abstract.** Modeling of input parameters for systems controlled by neural interfaces is considered. The relevance of the issue for transport technological systems is considered. Bioelectric signals are used as input parameters for activating control code algorithms. When forming the input signal, the parameters of the rhythms of the electroencephalogram are taken into account. The result is a device capable of reading the electromyogram signals and acting on the control object in accordance with a given algorithm. The input signal from the sensors varies depending on the condition of the muscles to which the electrodes are connected. The signal controls the translational and rotational movements of the layout. The software control model is based on the principles of flexible logic, so it is possible to configure the system for biological signals of varying accuracy.

**Keywords:** programming of neural interfaces, control code, bioelectric signal, microcontroller.

## INTRODUCTION

Technical systems with built-in neural interfaces have appeared in various industries for a long time. Initially, the technology of neurointerfaces was used in medicine to identify various disorders of the brain or for its research. But scientific research in this area has proven the effectiveness of the use of neurotechnologies for controlling industrial manipulators and robots, as well as various automated systems. The principle of neural networks expands control capabilities and increases the number of algorithms for interaction within systems. These are so-called artificial intelligence systems in the field of business, medicine [1], geology, physics [2], transport, etc. [3].

When designing and creating neural interfaces, scientific knowledge of interdisciplinary fields such as biology and human physiology, physics, mathematics, programming, circuit engineering is used. Complex hardware and information systems connect impulses of brain neurons or signals coming from contracting muscles and external control objects. Management objects can be physical and virtual [4].

When creating neural interfaces, the following are used:

- standard algorithms and diagrams for processing electrical signals of the human cerebral cortex;
- software testing algorithms;
- methods of forming technical specifications and drawing up electrical functional circuits;
- the principle of operation of the brain-computer interface;
- visualization methods and communication with a programmable logic controller;
- setting limit input values;
- technologies of software and industrial interfaces «brain-computer»

The main task at the initial stage of designing neural interfaces is to create algorithms for recognizing the main rhythms of the brain and muscle contractions. If the input parameters are misinterpreted, the technological system will start processing an inaccurate or false signal. This can lead to an incorrect output signal and disrupt its safe operation [5, 6].

In order to avoid such situations, it is necessary to fine-tune special software and peripheral device drivers, if necessary.

A person is a complex object of measurement. It is necessary to take into account its psychological and physiological characteristics. Only then can the measurement results be used as an input source for the technical system. And understanding the fundamental differences of biological signals will allow you to choose the correct processing algorithm [7].

It is important to know and use in analytical calculations the features of connection and operation of devices for recording and analyzing electroencephalograms and evoked potentials. The level of accuracy of the measuring device gives a signal of appropriate quality. The amplitude characteristics of the electroencephalogram create the initial data for the formation of the input signal and the elimination of artifacts. Artifacts appear when a signal is received from the electrodes to the input ports. The interface device converts the input signal and generates an input control signal, but interference occurs. These are the artifacts. You can remove them only through a handler program or through improving the interface device.

When forming the input signal, the parameters of the rhythms of the electroencephalogram are taken into account. This allows you to choose a method for processing and analyzing the measured electroencephalogram signal and evoked potentials [8].

Oscilloscope, tester, potentiometer, rheostat are used as measuring instruments.

The design of the software architecture of industrial interfaces «brain-computer» is carried out in C++, Python. Other options are possible. The choice of language largely depends on the controlling microprocessor device [9, 10].

The microprocessor devices currently in use are capable of receiving an analog signal converted into a digital one. The signal type is changed by means of analog-to-digital converters built into the architecture of the control device or used as additional modules.

The block diagram of the technological system allows to obtain the initial nomenclature list for modeling the specified devices of industrial interfaces «brain-computer». The computational model will allow the analysis of physical processes occurring in electronic telecommunication devices. Modeling of the software and hardware of the technological system will

determine the main points of the system in which signal amplification or filtering is required, the need to adjust signal processing algorithms from the cerebral cortex or from muscle contractions [11–13].

The mathematical model takes into account the choice of the method of preparation and analysis of the psychological and emotional state of the measured object. The correct choice of the method affects the formation of the right attitude of the operator and determines the quality and accuracy of measurement.

#### MODELING OF THE BRAIN-COMPUTER INTERFACE

##### MODELING STAGES

The main stages of modeling the brain-computer interface will be the following:

1. Assembly and adjustment of a bionic movable layout: selection of the elementary base of components, assembly of the mechanical part of the layout, installation and connection of electronic components, adjustment of the layout to perform elementary translational and rotational movements.

2. Creation of program code to check the autonomous operation of the layout: building a block diagram of the device, forming a control code for an electrical circuit based on microprocessor electronics.

3. Investigation of the bioelectric activity of the operator's muscles using sensors to take an electromyogram: the use of psychological and physiological methods of adjustment and correction of the measuring object, the use of measuring instruments.

4. Electromyogram visualization: checking the visualization from each sensor, recording and processing the signal from the synchronization device.

5. Carrying out a functional test for the registration of artifacts.

6. Registration of an electromyogram during jaw compression.

7. Registration of an electromyogram when blinking.

8. Analysis of the influence of interference on the electroencephalogram signal: signal processing through special software, the final configuration of the circuit and control logic.

9. Creation of program code for signal processing and control of I/O ports.

10. Creation of an autonomous control system for a bionic model of a human hand.

11. Implementation of the possibility of configuring the system for a specific operator: checking the control of hand movements using electromyogram and electroencephalogram signals coming from the measuring object under various muscle conditions [14].

#### HARDWARE MODELING AND MEASUREMENT OF INPUT PARAMETERS

Within the framework of hardware modeling, a bionic model with the number of degrees of freedom necessary for translational and rotational motion was assembled and configured. The selection of parts and electronic components for the mechanical part of the layout was carried out from a standard list.

The Arduino microcontroller board is used as the control unit. The signal is transmitted to the system via an expansion board. The servo drive ensures the mobility of the model elements. After assembly and connection, the layout is configured:

- determination of minimum and maximum shaft deflection angles for all servos;
- determination of the direction and speed of rotation.

To implement the correct configuration of the layout, additional electronic components are used: potentiometers, LEDs. The first ones provide mechanical debugging of the trajectory. The second one checks the correctness of the logical assembly of the hardware model and the correctness of the connection of the I/O ports. This is important if there is no main control code yet [15].

Electromyogram sensors are connected to the Arduino board to study the bioelectric activity of the muscles of the object. Electromyograms from each sensor are visualized. Individual elements are detected in the signal and processed independently. Standard software provided by the Arduino board developer company is used for processing.

The result of the described process is a device capable of reading the electromyogram signals and acting on the control object in accordance with a given algorithm.

The next task is to obtain a single autonomous system that combines a bionic mobile layout and a control device with electromyogram sensors. The input signal from the sensors varies depending on the condition of the muscles to which the electrodes are connected. The signal controls the translational and rotational movements of the layout. The number of states depends on the trajectories of the moving parts of the model [16].

The control program is based on the principles of flexible logic [17]. Therefore, the system can be tuned to biological signals of varying accuracy [18]. The source of the biological signal can also be adjusted and changed.

Under ideal experimental conditions, the same type of biological signals received from different sources affect the control object identically.

The source of the input signal can be not only the bioelectric activity of the muscles, but also  $\alpha$ -waves measured using electrodes fixed on the surface of the operator's head. Also, these electrodes receive a signal initiated by blinking or jaw compression. Such measurement requires higher accuracy in processing. This is due to the high probability of the appearance of many artifacts during signal registration.

#### VISUALIZATION OF INPUT PARAMETERS

Visualization of input parameters was carried out using the Bitronics Studio software. Fifty comparative measurements were performed. Of these, the first ten can be considered as installation ones, since the electrode contact was adjusted and the search for an equilibrium psychological and physical state of the measuring object was performed. The results of each measurement are analyzed for the appearance of artifacts. The control signal is formed from the most accurate measurement results. The fewer artifacts, the better.

Figure 1 shows the results of measuring and processing the electromyogram signal from one sensor, taking into account the identified artifacts. The electrode contacts the relaxed muscles.

Figure 2 shows the results of measurements with the same electrode without changing the point of contact, but with muscle tension.

Then, before processing the electromyogram signal, a program code was created to control the actuators. An example of the code is shown in Figure 3 [14].

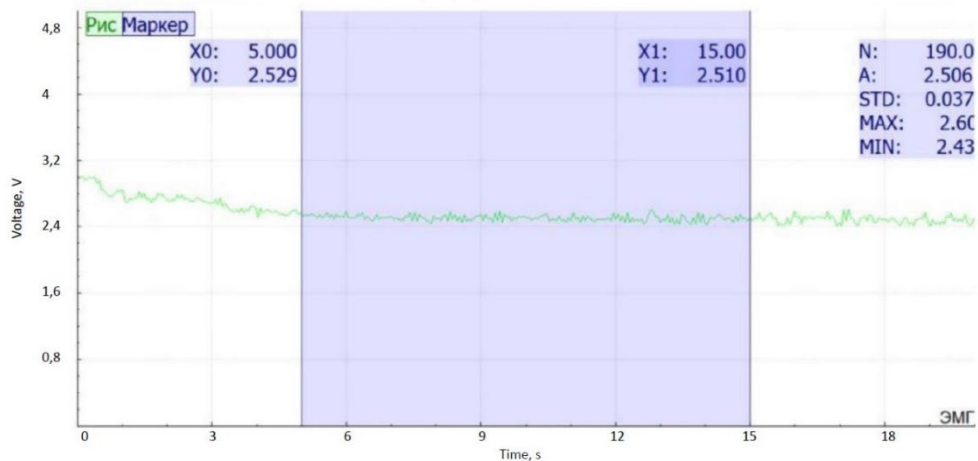


Fig. 1. Visualization of an electromyogram from a single sensor. Muscles are relaxed

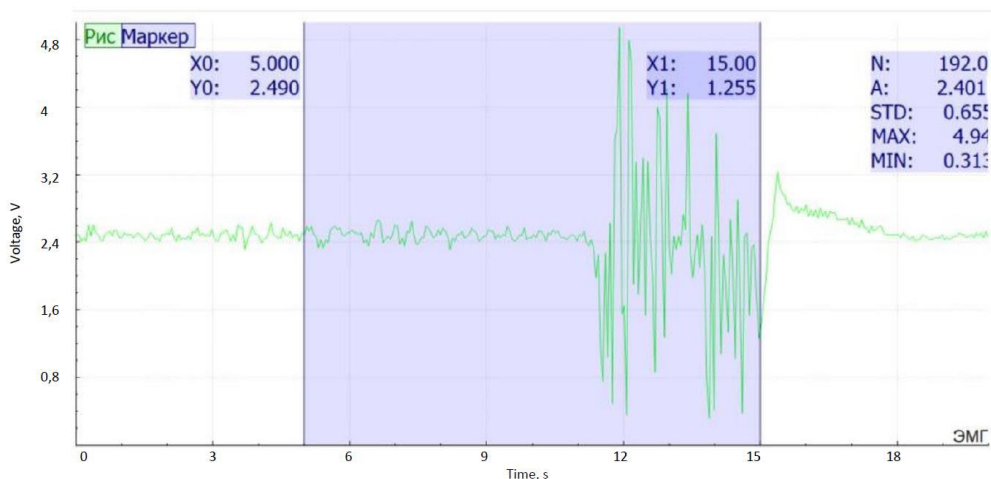


Fig. 2. Visualization of an electromyogram from a single sensor. Muscles are tense

```

13
14 void loop () {
15     emg1=analogRead (A0);
16     Serial.write ("A0");
17     // Serial.write (emg1);
18     sign1=map(emg1, 0, 1023, 0, 255);
19     Serial.write (sign1);
20     if (sign1>153)
21     {
22         digitalWrite (LEDpin1, HIGH);
23     }
24     else
25     {
26         digitalWrite (LEDpin1, LOW);
27     }
28
29     emg2=analogRead (A1);
30     delay (50);
31     sign2=map(emg2, 0, 1023, 0, 255);
32     Serial.write (sign2);
33     if (sign2>135)
34     {
35         digitalWrite (LEDpin2, HIGH);
36     }
37     else
38     {
39         digitalWrite (LEDpin2, LOW);
40     }

```

Скрин захвачен  
 Скетч использует 2286 байт (7%) памяти устройства. Всего доступно 32256 байт.  
 Глобальные переменные используют 196 байт (5%) динамической памяти, оставляя 1852 байт для локальных переменных. Максимум: 2048 байт.

Fig. 3. The program code for controlling the actuators before processing the electromyogram signal



The program for signal processing (finding the amplitude) and controlling the actuators using the processed electromyogram signal is shown in Figure 4.

The software and hardware parts of the model are combined. the input signal is corrected. The measurement results are loaded into the handler. The signal is filtered and compiled.

Figure 5 shows the visualization of the processed signal with relaxed muscles.

Figure 6 shows the visualization of the processed signal with tense muscles.

```

10 int sign2MIN=255;
11 int sign1AMPL=0;
12 int sign2AMPL =0;
13 int i=0;
14
15 void aa() {
16     sign1AMPL=0;
17     sign2AMPL =0;
18     for (i; i<36; i++) {
19         emg1=analogRead(A0);
20         sign1=map(emg1, 0, 1023, 0, 255);
21         emg2=analogRead(A1);
22         sign2=map(emg2, 0, 1023, 0, 255);
23         if (sign1> sign1MAX) sign1MAX= sign1;
24         if (sign1> sign1MIN) sign1MIN= sign1;
25         if (sign2> sign2MAX) sign2MAX= sign2;
26         if (sign2> sign2MIN) sign2MIN= sign2;
27     }
28     sign1AMPL=0.3*sign1+0.7*( sign1MAX- sign1MIN);
29     sign2AMPL=0.3*sign2+0.7*( sign2MAX- sign2MIN);
30     Serial.write("A0");
31     Serial.write (sign1AMPL);
32     sign1MAX=0;
33     sign1MIN=255;
34     sign2MAX=0;
35     sign2MIN=255;
36     i=0;
37 }
38
39 void setup() {;
40     Serial.begin (9600);
41     pinMode (LEDpin1,OUTPUT);
42     pinMode (LEDpin2,OUTPUT);
43 }
44
45 void loop() {;
46     aa();
47
48     if (sign1>60);
49     {
50         digitalWrite(LEDpin1,HIGT);
51     }
52     else
53     {
54         digitalWrite(LEDpin1,LOW);
55     }
56
57     if (sign2>60);
58     {
59         digitalWrite(LEDpin2,HIGT);
60     }
61     else
62     {
63         digitalWrite(LEDpin2,LOW);
64     }
65
66
67

```

Fig. 4. A program for signal processing and control of actuators using a processed electromyogram signal

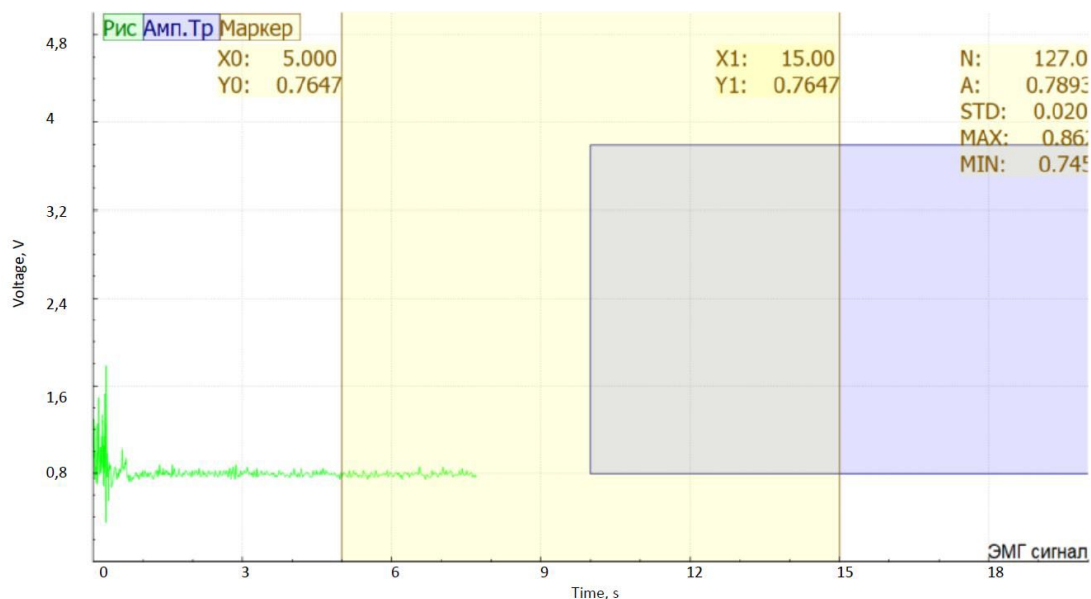


Fig. 5. Visualization of the processed signal with relaxed muscles

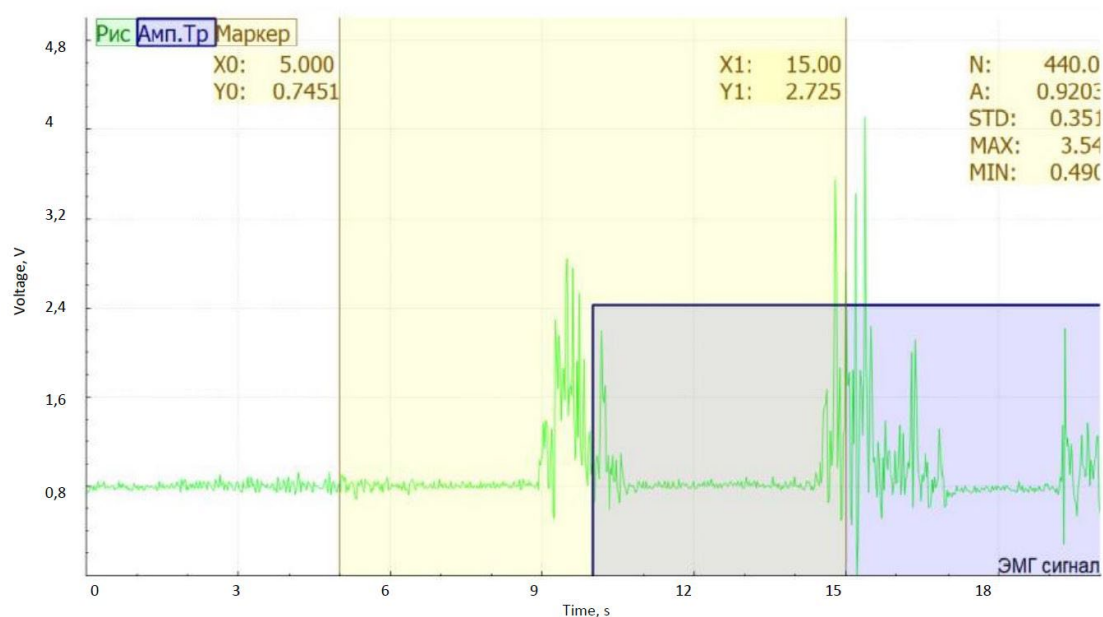


Fig. 6. Visualization of the processed signal with tense muscles

The processed signal is used as the initial information to activate the control algorithm for dynamic processes in the model under consideration. In this case, when the muscle is strained by the operator, the model makes a linear forward movement, when the muscle relaxes, it stops. A different degree of tension provokes a forward backward movement or rotation of the moving part of the model clockwise and counterclockwise.

Thus, a control code has been created to influence the technical system in five parameters. The operator must maintain the concentration of attention selected during the preliminary tests. It reproduces the same level of muscle tension. Only then does the accuracy and correctness of the reaction of the mechanical part of the model meet expectations.

When using two sensors, the following algorithm can be set for the control program.

Depending on the tension and relaxation of the two muscles operator (for example, the muscles, the flexors and extensors in the forearm) are translational, rotational, and reverse motion: momentum (both muscles tense), moving backward (both muscles are relaxed), clockwise rotation (muscles flexors tight extensors are relaxed), counterclockwise rotation (muscles relaxed flexors, extensors tense).

In the program code, a library is connected to work with servos. The minimum and maximum rotation angle for each servo is set. The speed of movement of the moving elements of the model is set. Software objects are created to work with each servo motor.

Variables are formed to store the raw and processed values of the electromyogram. Threshold values are indicated for determining the state of the muscle — relaxed/tense.

Variables for storing minimum and maximum values during processing are specified in the range from 0 to 255. A memory area is allocated to store the rotation angle of the servo shaft (for each servo).

To calculate the amplitude of the electromyogram, a subroutine is used [19]:

```
void calc_amp0 {
for (int k = 0; k < 32; k++) {
emg1 = analogRead(A0);
emg2 = analogRead(A1);
emg1 = map(emg1, 0, 1023, 0, 255);
emg2 = map(emg2, 0, 1023, 0, 255);
if (emg1 > max1)
max1 = emg1;
if (emg1 < min1)
min1 = emg1;
if (emg2 > max2)
max2 = emg2;
if (emg2 < min2)
min2 = emg2;
}
amp1 = 0.3*amp1 + 0.7*(max1 - min1);
amp2 = 0.3*amp2 + 0.7*(max2 - min2);
}
```

The main code describes the main events in the system, taking into account the degree of muscle tension, conditions for reaching thresholds or inactivity.

#### CONCLUSION

The use of neural interfaces to control production and transport systems will improve the accuracy of the control code thanks to methods and algorithms for processing and converting the original signals obtained by measuring the bioelectric activity of muscles and alpha waves of the brain [20, 21]. Increasing the level of information security depends on the limitations of the model. Constraints are influenced by external factors that initiate dynamic processes [21–24].

However, the disadvantage can be considered labor-intensive when changing the biosignal source. In this case, an adjustment of the input code is required, because according to physiological and psychological indicators, bioelectric signals from different objects cannot have a complete match. This leads to the question of interpretation of such signals. Current-

ly, there are no precise algorithms and techniques that give an indisputable reading of bioelectric parameters. The quality largely depends on the features of the signal visualization software, the accuracy of measuring instruments, and the quality of the connecting electrodes.

Also, a number of uncertain parameters arise during the mathematical analysis of dynamic processes in industrial and transport systems [21]. In this regard, forecasting the development of events causes difficulty and generates many options. This forces developers to create a multi-level control program that includes algorithms for as many probabilities of possible states of the system as possible. For a typical dynamic system with certain parameters, this probability is a value having from ten to fifty digits. In technical systems controlled by neural interfaces, the number of elementary states can lead to redundancy of the control code. It will take too many probabilistic algorithms. In the future, it is necessary to develop a software and mathematical apparatus capable of efficiently analyzing input parameters with a large number of artifacts. Then you can use weaker signals.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their gratitude to the chief expert of the regional championships in St. Petersburg World Skills Russia «Designing neural interfaces» Ilyushina A. N. for advice on the issue under study.

#### REFERENCES

1. Sokolov S. S., Kondratiev A. N., Lesteva N. A., Dryagina N. V. Automation of Intraoperative Analysis of Indicators the Inflammatory Response of Neurosurgical Patients Undergoing Brain Tumors Removal, *Proceedings of the Ural Environmental Science Forum «Sustainable Development of Industrial Region» (UESF-2021), Chelyabinsk, Russia, February 17–19, 2021. E3S Web of Conferences, 2021, Vol. 258, Art. No. 04005, 10 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202125804005.*
2. Sokolov S. S., Zhilenkov A. A., Chernyi S. G., et al. Hybrid Neural Networks in Cyber Physical System Interface Control Systems, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 2020, Vol. 9, No. 3, Pp. 1268–1275. DOI: 10.11591/eei.v9i3.1293.*
3. Aggarwal C. C. *Neural Networks and Deep Learning: A Textbook.* Cham, Springer Nature, 2018, 520 p. DOI: 10.1007/978-3-319-94463-0.
4. Altaisky M. V., Krylov V. A. Signal Identification Based on Multiscale Decompositions. In: *Sree Hari Rao V. (ed.). Information Technology for Real World Problems.* Hyderabad, Orient Blackswan, 2011, Pp. 178–221.
5. Bagnall A., Lines J., Bostrom A., et al. The Great Time Series Classification Bake Off: A Review and Experimental Evaluation of Recent Algorithmic Advances, *Data Mining and Knowledge Discovery, 2017, Vol. 31, Is. 3, Pp. 606–660. DOI: 10.1007/s10618-016-0483-9.*
6. Goodfellow I. NIPS 2016 Tutorial: Generative Adversarial Networks, *arXiv, 2017, Vol. 1701.00160, 57 p. DOI: 10.48550/arXiv.1701.00160.*
7. Foster D. *Generative Deep Learning: Teaching Machines to Paint, Write, Compose and Play.* Sebastopol (CA), O'Reilly Media, 2019, 330 p.
8. Esbensen K. H., Guyot D., Westad F., Houmøller L. P. *Multivariate Data Analysis — In Practice.* Fifth Edition. An Introduction to Multivariate Data Analysis and Experimental Design. Oslo, CAMO Software AS, 2004, 616 p.
9. McKinney W. *Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython.* First Edition. Sebastopol (CA), O'Reilly Media, 2012, 466 p.
10. Golemund G., Wickham H., *R for Data Science: Import, Tidy, Transform, Visualize, and Model Data.* First Edition. Sebastopol (CA), O'Reilly Media, 2017, 518 p.
11. Specht D. F. A General Regression Neural Network, *IEEE Transactions on Neural Networks, 1991, Vol. 2, Is. 6, Pp. 568–576. DOI: 10.1109/72.97934.*
12. Srivastava N., Hinton G. E., Krizhevsky A., et al. Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting, *Journal of Machine Learning Research, 2014, Vol. 15, Pp. 1929–1958. DOI: 10.5555/2627435.2670313.*
13. Goodfellow I. J., Pouget-Abadie J., Mirza M., et al. Generative Adversarial Nets, *arXiv, 2014, Vol. 1406.2661, 9 p. DOI: 10.48550/arXiv.1406.2661.*
14. Sutskever I., Martens J., Dahl G. E., Hinton G. E. On the Importance of Initialization and Momentum in Deep Learning, *Proceedings of the 30th International Conference on Machine Learning (ICML 2013), Atlanta, GA, USA, June 17–19, 2013. Proceedings of Machine Learning Research, 2013, Vol. 28, No. 3, Pp. 1139–1147.*
15. Rivero D., Gestal M., Rabuñal J. R. *Genetic Programming: key concepts and examples: A brief tutorial on Genetic Programming.* Saarbrücken, Lambert Academic Publishing, 2011, 56 p.
16. Nyrkov A. P., Kardakova M. V., Kolesnichenko S. V., et al. Modeling the Operating Range of the Fire Safety System Response Parameters on Board, *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), Saint Petersburg, Moscow, Russia, January 27–30, 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020, Pp. 434–437. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9038955.*
17. Nyrkov A. P., Zhilenkov A. A., Sokolov S. S., Chernyi S. G. The Use of Fuzzy Control Methods for Evaluation of Complex Systems on the Example of Maritime Fleet Equipment, *Vibroengineering PROCEDIA, 2016, Vol. 8, Pp. 6–10.*
18. Boriev Z. V., Sokolov S. S., Nyrkov A. P., Nekrasova A. A. Mathematical and Information Maintenance of Biometric Systems, *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015 (MEACS 2015), Tomsk, Russia, December 01–04, 2015. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, Vol. 124, Art. No. 012046, 4 p. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012046.*
19. Svetlov V. A., Dolenko S. A. Development of the Algorithm of Adaptive Construction of Hierarchical Neural Network Classifiers, *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics), 2017, Vol. 26, No. 1, Pp. 40–46. DOI: 10.3103/S1060992X17010076.*
20. Yemelyanov V. A., Yemelyanova N. Yu., Shved E. V., et al. Modeling of the Multilayer Perceptrons for Image Recognition of the Steel Microstructures, *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), Saint Petersburg, Moscow, Russia, January 27–30, 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020, Pp. 952–955. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9038971.*

21. Sokolov S. S., Zhilenkov A. A., Chernyi S. G., et al. Dynamics Models of Synchronized Piecewise Linear Discrete Chaotic Systems of High Order, *Symmetry*, 2019, Vol. 11, Is. 2, Art No. 236, 12 p. DOI: 10.3390/sym11020236.

22. Kotenko I. V., Saenko I. B., Lauta O. S. Analytical Modeling and Assessment of Cyber Resilience on the Base of Stochastic Networks Conversion, *Proceedings of the 10th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling (RNDM 2018)*, Longyearbyen, Norway, August 27–29, 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018, Pp. 1–8. DOI: 10.1109/RNDM.2018.8489830.

23. Sokolov S. S., Alimov O. M., Trubacheva Yu. A., et al. Providing Security for Virtual Infrastructures Based on an Integrated Mechanism, *Proceedings of the 2018 IEEE Confer-*

*ence of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, Moscow, Saint Petersburg, Russia, January 29–February 01, 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018, Pp. 132–135. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317047.

24. Saenko I. B., Ageev S. A., Kotenko I. V. Detection of Traffic Anomalies in Multi-Service Networks Based on a Fuzzy Logical Inference. In: *Badica C., et al. (eds.) Intelligent Distributed Computing X (IDC'2016): Proceedings of the 10th International Symposium on Intelligent Distributed Computing, Paris, France, October 10–12, 2016*. Cham, Springer Nature, 2017, Pp. 79–88. (Studies in Computational Intelligence, Vol. 678). DOI: 10.1007/978-3-319-48829-5\_8.

# Управление техническими системами с помощью нейроинтерфейса

Ю. В. Цымай, д.т.н. А. П. Нырков, М. В. Кардакова

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Санкт-Петербург, Россия

m-walua@yandex.ru, apnyrkow@mail.ru, m.v.kardakova@ya.ru

**Аннотация.** Рассматривается моделирование входных параметров для систем, управляемых нейроинтерфейсами. Рассмотрена актуальность проблемы для транспортных технологических систем. Биоэлектрические сигналы используются в качестве входных параметров для активации алгоритмов управляющих кодов. При формировании входного сигнала учитываются параметры ритмов электроэнцефалограммы. Результатом является устройство, способное считывать сигналы электромиограммы и воздействовать на объект управления в соответствии с заданным алгоритмом. Входной сигнал от датчиков варьируется в зависимости от состояния мышц, к которым подключены электроды. Сигнал управляет поступательными и вращательными движениями макета. Модель программного управления основана на принципах гибкой логики, поэтому можно настроить систему на биологические сигналы различной точности.

**Ключевые слова:** программирование нейроинтерфейсов, управляющая программа, биоэлектрический сигнал, микроконтроллер.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Automation of Intraoperative Analysis of Indicators the Inflammatory Response of Neurosurgical Patients Undergoing Brain Tumors Removal / S. S. Sokolov, A. N. Kondratiev, N. A. Lesteva, N. V. Dryagina // Proceedings of the Ural Environmental Science Forum «Sustainable Development of Industrial Region» (UESF-2021) (Chelyabinsk, Russia, 17–19 February 2021). E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 258. Art. No. 04005. 10 p.  
DOI: 10.1051/e3sconf/202125804005.

2. Hybrid Neural Networks in Cyber Physical System Interface Control Systems / S. S. Sokolov, A. A. Zhilenkov, S. G. Chernyi, [et al.] // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2020. Vol. 9, No. 3. Pp. 1268–1275.  
DOI: 10.11591/eei.v9i3.1293.

3. Aggarwal, C. C. Neural Networks and Deep Learning: A Textbook. — Cham: Springer Nature, 2018. — 520 p.  
DOI: 10.1007/978-3-319-94463-0.

4. Altaisky, M. V. Signal Identification Based on Multiscale Decompositions / M. V. Altaisky, V. A. Krylov // Information Technology for Real World Problems / V. Sree Hari Rao (ed.). — Hyderabad: Orient Blackswan, 2011. — Pp. 178–221. — (Universities Press Series in Systems, Models, Informatics and Control).

5. The Great Time Series Classification Bake Off: A Review and Experimental Evaluation of Recent Algorithmic Advances / A. Bagnall, J. Lines, A. Bostrom, [et al.] // Data Mining and Knowledge Discovery. 2017. Vol. 31, Is. 3. Pp. 606–660.  
DOI: 10.1007/s10618-016-0483-9.

6. Goodfellow, I. NIPS 2016 Tutorial: Generative Adversarial Networks // arXiv. 2017. Vol. 1701.00160. 57 p.  
DOI: 10.48550/arXiv.1701.00160.

7. Foster, D. Generative Deep Learning: Teaching Machines to Paint, Write, Compose and Play. — Sebastopol (CA): O'Reilly Media, 2019. — 330 p.

8. Multivariate Data Analysis — In Practice. Fifth Edition. An Introduction to Multivariate Data Analysis and Experimental Design / K. H. Esbensen, D. Guyot, F. Westad, L. P. Houmøller. — Oslo, [et al.]: CAMO Software AS, 2004. — 616 p.

9. McKinney, W. Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython. First Edition. — Sebastopol (CA): O'Reilly Media, 2012. — 466 p.

10. Golemund, G. R for Data Science: Import, Tidy, Transform, Visualize, and Model Data. First Edition / G. Golemund, H. Wickham. — Sebastopol (CA): O'Reilly Media, 2017. — 518 p.

11. Specht, D. F. A General Regression Neural Network // IEEE Transactions on Neural Networks. 1991. Vol. 2, Is. 6. Pp. 568–576. DOI: 10.1109/72.97934.

12. Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting / N. Srivastava, G. E. Hinton, A. Krizhevsky, [et al.] // Journal of Machine Learning Research. 2014. Vol. 15. Pp. 1929–1958. DOI: 10.5555/2627435.2670313.

13. Generative Adversarial Nets / I. J. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza, [et al.] // arXiv. 2014. Vol. 1406.2661. 9 p. DOI: 10.48550/arXiv.1406.2661.

14. On the Importance of Initialization and Momentum in Deep Learning / I. Sutskever, J. Martens, G. E. Dahl, G. E. Hinton // Proceedings of the 30th International Conference on Machine Learning (ICML 2013) (Atlanta, GA, USA, 17–19 June 2013). Proceedings of Machine Learning Research. 2013. Vol. 28, No. 3. Pp. 1139–1147.

15. Rivero, D. Genetic Programming: key concepts and examples: A brief tutorial on Genetic Programming / D. Rivero, M. Gestal, J. R. Rabuñal. — Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2011. — 56 p.

16. Modeling the Operating Range of the Fire Safety System Response Parameters on Board / A. P. Nyrkov, M. V. Kardakova, S. V. Kolesnichenko, [et al.] // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), (Saint Petersburg, Moscow, Russia, 27–30 January 2020). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020. — Pp. 434–437. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9038955.

17. The Use of Fuzzy Control Methods for Evaluation of Complex Systems on the Example of Maritime Fleet Equipment / A. P. Nyrkov, A. A. Zhilenkov, S. S. Sokolov, S. G. Chernyi // Vibroengineering PROCEDIA. 2016. Vol. 8. Pp. 6–10.

18. Mathematical and Information Maintenance of Biometric Systems / Z. V. Boriev, S. S. Sokolov, A. P. Nyrkov, A. A. Nekrasova // Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015 (MEACS 2015), (Tomsk, Russia, 01–04 December 2015). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 124. Art. No. 012046. 4 p. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012046.

19. Svetlov, V. A. Development of the Algorithm of Adaptive Construction of Hierarchical Neural Network Classifiers / V. A. Svetlov, S. A. Dolenko // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2017. Vol. 26, No. 1. Pp. 40–46. DOI: 10.3103/S1060992X17010076.

20. Modeling of the Multilayer Perceptrons for Image Recognition of the Steel Microstructures / V. A. Yemelyanov, N. Yu. Yemelyanova, E. V. Shved, [et al.] // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), (Saint Petersburg, Moscow, Russia, 27–30 January 2020). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020. — Pp. 952–955. DOI: 10.1109/ElConRus49466.2020.9038971.

21. Dynamics Models of Synchronized Piecewise Linear Discrete Chaotic Systems of High Order / S. S. Sokolov, A. A. Zhilenkov, S. G. Chernyi, [et al.] // Symmetry. 2019. Vol. 11, Is. 2. Art No. 236. 12 p. DOI: 10.3390/sym11020236.

22. Kotenko, I. V. Analytical Modeling and Assessment of Cyber Resilience on the Base of Stochastic Networks Conversion / I. V. Kotenko, I. B. Saenko, O. S. Lauta // Proceedings of the 10th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling (RNDM 2018), (Longyearbyen, Norway, 27–29 August 2018). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. — Pp. 1–8. DOI: 10.1109/RNDM.2018.8489830.

23. Providing Security for Virtual Infrastructures Based on an Integrated Mechanism / S. S. Sokolov, O. M. Alimov, Yu. A. Trubacheva, [et al.] // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), (Moscow, Saint Petersburg, Russia, 29 January–01 February 2018). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. — Pp. 132–135. DOI: 10.1109/ElConRus.2018.8317047.

24. Saenko, I. B. Detection of Traffic Anomalies in Multi-Service Networks Based on a Fuzzy Logical Inference / I. B. Saenko, S. A. Ageev, I. V. Kotenko // Intelligent Distributed Computing X (IDC'2016): Proceedings of the 10th International Symposium on Intelligent Distributed Computing (Paris, France, 10–12 October 2016) / C. Badica, [et al.] (eds.). — Cham: Springer Nature, 2017. — Pp. 79–88. — (Studies in Computational Intelligence. Vol. 678). DOI: 10.1007/978-3-319-48829-5\_8.

# Autonomous Technical Means — A Tool of a Transport Security Violator

Grand PhD S. S. Sokolov, O. N. Gubernatorov, E. K. Egorova  
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
Saint Petersburg, Russia  
sokolovss@gumrf.ru, ovel82@mail.ru, AlisBrain@mail.ru

**Abstract.** The concepts are considered: automation, autonomy, technical means. The definition of the concept of an autonomous technical means is given. Autonomous technical means are considered as technical means with the ability to perform certain actions without human intervention. Autonomous technical means were defined as products with various degree of endurance according to a predetermined function. The analysis of legal regulation in the field of creation, implementation, use of autonomous technical means is carried out. It is concluded that there is an urgent need to create new approaches to the legal regulation of this area. The possibilities that an autonomous technical means should have for their use as a transport safety violator have been determined. Autonomous technical means with remote control technology are subdivided by the type of communication channel (mechanical, wire, radio, ultrasonic, infrared). Autonomous technical means such as unmanned aerial vehicles, RC Sports Models & Toys and Special technical means are proposed to be considered as a potential threat to transport security. A brief overview of the allocated autonomous technical means is given, as well as a comparative analysis. The comparison was made according to such characteristics as average autonomous operation time, remoteness from the operator, remoteness from the object, availability of standard means of photo/video recording, availability of standard storage medium, feedback function, availability in the market, pricing. It is concluded that the UAV is a multipurpose vehicle that can be used both for collecting data and for influencing a transport infrastructure object (can be used to destroy (attack) any targets).

**Keywords:** transport security, sea port, autonomous technical facility.

## INTRODUCTION

The modern life may be defined as the time of the fourth technological revolution, which is due to the emergence and spreading of cyber-physical and artificial cognitive systems in the public life. Our time is characterized by omnipresent automation and, as a consequence, by the creation and dissemination of autonomous technical means. Such technical means have the ability to perform certain actions without human participation, and the degree of endurance has different gradation [1]. In this article the authors proposed to consider the possibility of using autonomous technical means as a tool for obtaining information in the context of transport safety at the transport infrastructure facility. This topic seems to be relevant due to the fact that should autonomous technical means be used by a penetrator for obtaining information about a transport infrastructure facility for the purposes of committing an act of unlawful interference, the risk of prosecution for such socially dangerous act shall be reduced.

## DEFINITION

Automation is the direction of scientific and technological progress, which uses self-regulating technical means and math-

ematical methods to exclude people from participation in various processes. Thus, a human shall be involved to a lesser extent if at all (still retaining full control). Expansion of automation results in the creation and deployment of autonomous technical means. Existing tentative legislative acts make no use of the concept of autonomous technical means. However, for the purposes of this study, it seems necessary to define the term «autonomous technical means». Let us define the term «autonomy» as a possession of autonomy, an independence from anything (in Kant's philosophy, the «autonomy» is a principle of independent existence following one's own senses and conscience [2]). Another source suggests that autonomy is a characteristic of highly organized systems, according to which the functioning and behavior of such systems is determined by their internal foundations, not prone to the influence of the external environment or other systems [3]. Technical means are structurally completed products designed to perform certain functions for end users [4]. Thus, let us elaborate the following definition.

Autonomous technical means are structurally completed products that perform certain functions for end users, the functioning and behavior of which shall be determined by internal foundations, not prone to the influence of the external environment or other systems. Of course, the degree of autonomy varies, and, undoubtedly, as a rule, in our generation the final decision is ultimately made by humans. However, as a child of scientific and technological progress, the automation does not stand still, and the pace of artificial intelligence development and expansion is quite impressive.

## LEGISLATION

The statutory regulation of the deployment of autonomous technical means is just emerging. Given the fact that now the law is treating technical means only as (im)movable or intellectual property, one cannot deny the existence of a «gap» that needs to be filled, though it is not yet clear how. But nevertheless, where the latter decision is made by humans, the legal nature would remain unchanged. The study of D. L. Kruteynikov, O. A. Izhayev, V. A. Lebedev and S. S. Zenin «Regulation of Interaction of an Individual with Autonomous Technical Devices: Legal Regimes Discussion» suggested the following models of human-autonomous technical means [1]:

- interaction (actions of the autonomous technical means are under human control, or have no legal significance);
- coexistence (where autonomous technical means may become independent participants of social relations, and perform legally significant actions);
- integration (of autonomous technical means with a biological subject).

It may be concluded that there is a strong need for the creation of new approaches to the statutory regulation in this area.

POSSIBILITIES

In the context of transport security [5–8], let us turn our attention to autonomous technical means with the following characteristics that:

- exclude the need for the physical presence of the person who owns/operates such technical means;
- perform the function of real time photo-video recording;
- perform the function of photo-video recording and storage of the obtained data on the tangible medium (memory card).

Exclusion of human physical presence is a task that can be solved through the use of the following technologies [9]:

- remote control is a system of control signal transmission from the operator (using a transmitter - remote control device) to the technical means (receiver) located at a distance. Figure 1 presents the types of remote control systems by the communication channel types;
- autosteering system is a hardware and software complex, which is steering an object along a certain predetermined trajectory.

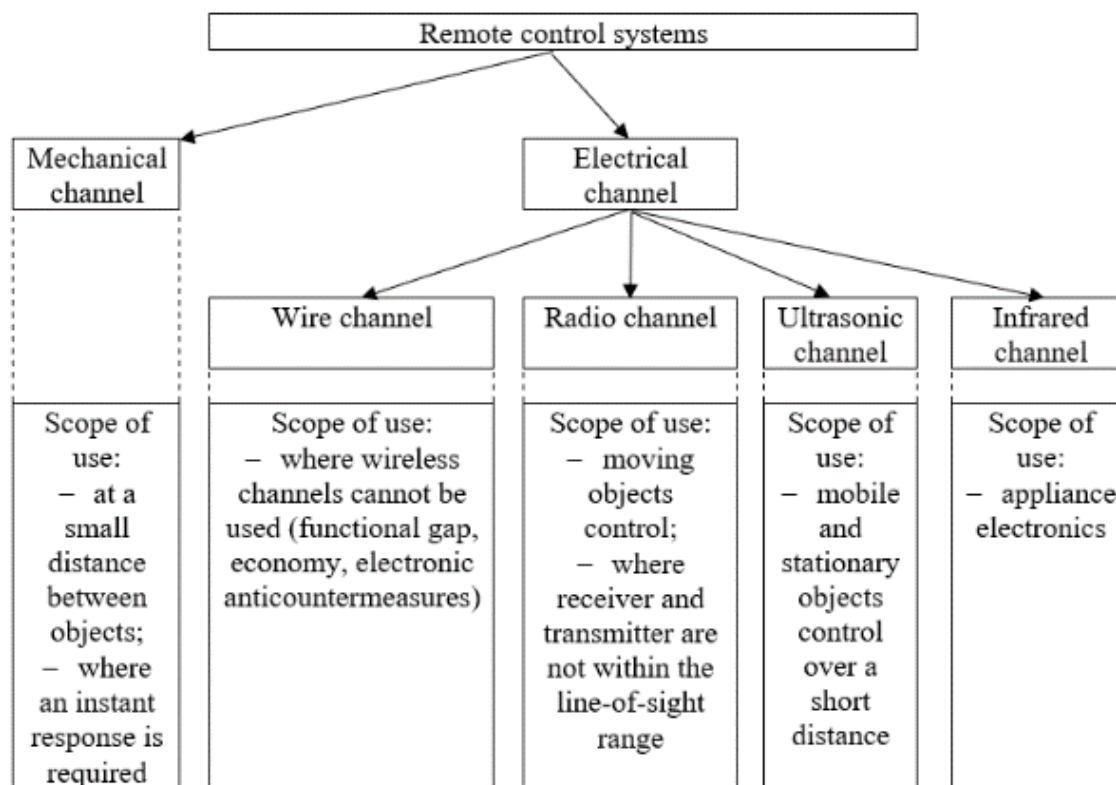


Fig. 1. Remote control classification

Within the context of the posed problem, hereinafter we will discuss autonomous technical means based on the radio remote control technology. Let us consider the following autonomous technical means:

- radio-controlled sports models and toys;
- special technical means;
- Unmanned Aerial Vehicles (hereinafter referred to as UAV).

REMOTE CONTROL SPORTS MODELS AND TOYS

Two main concepts of radio-controlled sports models are available in the market:

- «toys» are a kind of cars or trucks such as advertised in cartoons and shown on television, usually sold in electronic appliances and toy stores;
- KIT is a kit for assembling a sports car or truck;
- RTR is a ready-to-run radio-controlled cars, available only in specialized hobby stores or distributed by companies via mail through online stores.

For the purposes of our study, let's analyze the KIT and RTR models that are positioned as radio-controlled vehicles.

Radio-controlled vehicles are divided into two groups according to the motor type: electrical motor driven and internal combustion engine driven. The model types are as follows [10]:

- highway vehicles: for driving exclusively on a level surface;
- drifting car models: for track driving in a controlled drift;
- off-road vehicle models: for driving rough terrain of various complexity;
- trophy car models: low speed passing obstacles on rough terrain;
- trial car models: overcoming obstacles.

SPECIAL TECHNICAL MEANS

Special technical means are means, which are designed for surreptitious obtaining of information: instruments, systems, complexes, devices, special tools for entering into premises and other facilities, as well as software (SW) for computers and other electronic devices to get access to and/or obtain information from technical means for data storage, processing and/or communication, which are intentionally designed to provide the



function of surreptitious obtaining of information or unauthorized access to it without the knowledge of the owner thereof [11]. This area has not been described in open sources. However, from a news source, we managed to find a description of the Eyeball R1 device. Eyeball R1 is an autonomous and mobile video camera Eyeball R1, which is an armored ball. The ball may stabilize itself on the surface, and then start filming everything around it. The signal is transmitted via radio channel to the base station. The kit is a small case containing a mobile monitor with a control system, mounts and suspensions for different surfaces, a battery charger, and three balls: two have video cameras installed and the third one is a test ball. The size of the ball itself is comparable with a tennis ball, and its body is covered with a rubber shell [12].

UNMANNED AERIAL VEHICLES

UAV is an aircraft without a human pilot on board, and may have various degrees of autonomy: either under remote control of a human operator, or run an autonomous flight controlled by onboard computers or an autonomous robot [13].

Quite recently these aircrafts were used only for military purposes (to destroy aerial targets and gather intelligence) [14]. Nowadays, UAVs are widely deployed in civilian applications: surveillance, monitoring, business, public life, delivery services, etc.

Modern UAVs vary in characteristics. However, the basic principles underlying any UAV are:

- the ability to move independently in the air;
- the ability to maintain a predetermined altitude and flight velocity;
- the ability to carry additional payloads of different weight;
- the ability to mount additional equipment on the vehicle to capture data and transmit information to the operator in real time.

There are two types of drones by technical characteristics: airplane and helicopter types.

The aircraft models are based on the carrying planes/wings, which allow UAV have a high, long flight of a large radius. (Heli)copter-type UAVs are equipped with propellers. Depending on the number of propellers, UAVs are divided into:

- tricopter is equipped with 3 propellers;
- quadcopter has 4 propellers;
- hexacopter has 6 propellers;
- octocopter has 8 propellers.

Copter type drones are characterized by the smoothness and stability of the flight. The devices are suitable for monitoring the territory and detailed analysis thereof [15].

COMPARATIVE ANALYSIS

Figure 2 shows a comparison of the above-described autonomous technical means.

CONCLUSION

Autonomous technical means were defined as products with various degree of endurance according to a predetermined function. Analysis of the statutory regulation revealed the urgent need to review the existing and/or create new enactments that would take into account the already created and deployed autonomous technical means. It was determined that UAVs have characteristics that allow them to be used as a tool for the illegal data acquisition. Furthermore, note that UAVs can also be used to destroy (attack) any targets. Consequently, UAVs are

Specifications	Radio controlled sports models and toys	Emergency equipment	UAV
Average autonomous operation time, min	15	60	31
Remoteness from the operator, m	50	25000	6000
Remoteness from the object, m	--	150	--
Availability of standard means of photo/video recording	-	-	+
Availability of standard storage medium	-	-	+
Feedback function	-	-	+
Availability in the market	+	-	+
Pricing, RUB '000'	5-200	up to 400	30-1000

Fig. 2. Autonomous technical means

multi-purpose means, which can be used both for data acquisition and to attack a transport infrastructure facility. Attention should also be paid to the fact that UAVs are technical means, which are impossible or rather difficult to detect without the use of automated systems. Thus, in the course of this study, the authors of this article have identified the following areas of further study:

- analysis of means and methods of automated detection of a penetrator at a transportation infrastructure facility;
- automated UAV detection.

REFERENCES

1. Kuteynikov D. L., Izhaev O. A., Lebedev V. A., Zenin S. S. Regulirovanie vzaimodeystviya cheloveka s avtonomnymi tekhnicheskimi sredstvami: diskussiya o pravovykh rezhimakh [Regulation of Interaction of an Individual with Autonomous Technical Devices: Legal Regimes Discussion], *Lex russica (Russkiy zakon) [Lex Russica (The Russian Law)]*, 2019, No. 9, Pp. 85–95. DOI: 10.17803/1729-5920.2019.154.9.085-095. (In Russian)
2. Avtonomiya [Autonomy], *Vikipediya [Wikipedia]*. Last update October 26, 2021. Available at: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Автономия> (accessed 12 Nov 2021). (In Russian)
3. Sachkov Yu. V., Mozheyko M. A. Avtonomnost [Autonomy], *Gumanitarnyy portal [Humanitarian Portal]*. Available at: <http://gtmarket.ru/concepts/7169> (accessed 12 Nov 2021). (In Russian)
4. GOST R 51317.6.5-2006. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Ustoychivost k elektromagnitnym pomekham tekhnicheskikh sredstv, primenyaemykh na elektrostantsiyakh i podstantsiyakh. Trebovaniya i metody ispytaniy [Electromagnetic compatibility of technical equipment. Immunity of technical equipment intended for use in power stations and substations. Requirements and test methods]. Effective from July 01. 2007. Moscow, StandartInform Publishing House, 2007, 30 p. (In Russian)
5. Sokolov S. S., Saenko I. B., Mitrofanov M. A., et al. Analytical Modeling of Computer Attacks on Intelligent Transport Systems Based on the Transformation of Stochastic Networks. In: *Kovalev S., et al. (eds.) Intelligent Information Technologies*

for Industry (IITI'21): Proceedings of the Fifth International Scientific Conference Sirius, Russia, September 30–October 04, 2021. Cham, Springer Nature, 2021, Pp. 489–498. (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 330).

DOI: 10.1007/978-3-030-87178-9\_49.

6. Ilchenko L. M., Sokolov S. S., Egorova K. V., et al. Analysis of the Main Types of Automated Information Systems in the Transport Sector, Functioning Mainly in Urban Agglomerations, *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, Saint Petersburg, Moscow, Russia, January 26–28, 2021. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021, Pp. 401–406. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396630.

7. Shipunov I. S., Nyrkov A. P., Ryabekov M. U., et al. Investigation of Computer Incidents as an Important Component in the Security of Maritime Transportation, *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, Saint Petersburg, Moscow, Russia, January 26–29, 2021. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021, Pp. 657–660. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396501.

8. Shipunov I. S., Nyrkov A. P., Kardakova M. V., et al. Information System for Monitoring and Analyzing the Technical Condition of Autonomous Vehicles, *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, Saint Petersburg, Moscow, Russia, January 27–30, 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020, Pp. 497–500.

DOI: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039181.

9. Nyrkov A. P., Glebov N. B., Novoselov R. O., et al. Databases Problems for Maritime Transport Industry on Platform Highload, *Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS): Proceedings of the 2018 IEEE International Conference, St. Petersburg, Russia, September 24–28, 2018*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018, Pp. 132–135.

DOI: 10.1109/ITMQIS.2018.8525058.

10. Radiupravlyаемая avtomodel [Radio-Controlled Car], *Vikipediya [Wikipedia]*. Last update November 01, 2018. Available at: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Радиоуправляемая\\_автомодель](http://ru.wikipedia.org/wiki/Радиоуправляемая_автомодель) (accessed 12 Nov 2021). (In Russian)

11. Ugolovnyy kodeks Rossiyskoy Federatsii [Criminal Code of the Russian Federation] from June 13, 1996 (last ed. July 01, 2021 No. 293-FZ). (In Russian)

12. Dagestanskiy spetsnaz vooruzhat vysokotekhnologichnym oborudovaniem [Dagestan Special Forces Will Be Armed with High-Tech Equipment], *Informatsionnyy portal RIA «Dagestan» [Information Portal of the Advertising and Information Agency «Dagestan»]*. Published online at June 24, 2013. Available at: [http://riadagestan.ru/news/security/dagestan\\_spetsnaz\\_will equip\\_high\\_tech\\_equipment](http://riadagestan.ru/news/security/dagestan_spetsnaz_will equip_high_tech_equipment) (accessed 12 Nov 2021). (In Russian)

13. Nyrkov A. P., Sokolov S. S., Alimov O. M., et al. Optimal Identification for Objects in Problems on Recognition by Unmanned Underwater Vehicles, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2020, Vol. 54, Is. 8, Pp. 958–963.

DOI: 10.3103/S0146411620080234.

14. Shipunov I. S., Voevodskiy K. S., Nyrkov A. P., et al. About the Problems of Ensuring Information Security on Unmanned Ships, *Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, Saint Petersburg, Moscow, Russia, January 28–31, 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019, Pp. 339–343.

DOI: 10.1109/ElConRus.2019.8657219.

15. Chto takoe dron: kakie vidy byvayut i zachem oni? [What is a Drone: What Types Are There and Why Are They?], *OOO «Albatros» — rossiyskiy proizvoditel BVS (BPLA) [Albatros LLC is a Russian manufacturer of UAVs]*. Published online at June 05, 2019. Available at: <http://www.alb.aero/about/articles/chto-takoe-dron-kakie-vidy-byvayut-i-zachem-oni> (accessed 12 Nov 2021). (In Russian)

# Автономные технические средства — инструмент обнаружения нарушителя транспортной безопасности

д.т.н. С. С. Соколов, О. Н. Губернаторов, Е. К. Егорова

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова  
Санкт-Петербург, Россия

sokolovss@gumrf.ru, ovel82@mail.ru, AlisBrain@mail.ru

**Аннотация.** Рассматриваются понятия: автоматизация, автономность, технические средства. Дано определение понятия автономного технического средства. Автономные технические средства рассматриваются как технические средства, обладающие способностью выполнять определенные действия без вмешательства человека. Автономные технические средства были определены как изделия с различной степенью долговечности в соответствии с заданной функцией. Проведен анализ правового регулирования в области создания, внедрения, использования автономных технических средств. Делается вывод о том, что существует острая необходимость в создании новых подходов к правовому регулированию данной сферы. Определены возможности, которыми должно обладать автономное техническое средство для их использования в качестве нарушителя транспортной безопасности. Автономные технические средства с технологией дистанционного управления подразделяются по типу канала связи (механический, проводной, радио, ультразвуковой, инфракрасный). Автономные технические средства, такие как беспилотные летательные аппараты, радиоуправляемые спортивные модели и игрушки, а также специальные технические средства, предлагается рассматривать как потенциальную угрозу транспортной безопасности. Дан краткий обзор существующих автономных технических средств, а также приведен их сравнительный анализ. Сравнение проводилось по таким характеристикам, как среднее время автономной работы, удаленность от оператора, удаленность от объекта, наличие стандартных средств фото/видеозаписи, наличие стандартного носителя информации, функция обратной связи, доступность на рынке, ценообразование. Сделан вывод, что БПЛА является многоцелевым транспортным средством, которое может использоваться как для сбора данных, так и для воздействия на объект транспортной инфраструктуры (может использоваться для уничтожения (атаки) любых целей).

**Ключевые слова:** транспортная безопасность, морской порт, автономное техническое сооружение.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Регулирование взаимодействия человека с автономными техническими средствами: дискуссия о правовых режимах / Д. Л. Кутейников, О. А. Ижаев, В. А. Лебедев, С. С. Зенин // *Lex russica (Русский закон)*. 2019. № 9. С. 85–95. DOI: 10.17803/1729-5920.2019.154.9.085-095.
2. Автономия // Википедия. Посл. обновл. 26.10.2021. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Автономия> (дата обращения 12.11.2021).
3. Сачков, Ю. В. Автономность / Ю. В. Сачков, М. А. Можейко // Гуманитарный портал. URL: <http://gtmarket.ru/concepts/7169> (дата обращения 12.11.2021).

4. ГОСТ Р 51317.6.5-2006. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях. Требования и методы испытаний = Electromagnetic compatibility of technical equipment. Immunity of technical equipment intended for use in power stations and substations. Requirements and test methods: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2006 г. № 472-ст: дата введения 2007-07-01. — Москва: Стандартинформ, 2007. — 30 с.

5. Analytical Modeling of Computer Attacks on Intelligent Transport Systems Based on the Transformation of Stochastic Networks / S. S. Sokolov, I. B. Saenko, M. A. Mitrofanov, [et al.] // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'21): Proceedings of the Fifth International Scientific Conference (Sirius, Russia, 30 September–04 October 2021)* / S. Kovalev, [et al.] (eds.). — Cham: Springer Nature, 2021. — Pp. 489–498. — (Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 330). DOI: 10.1007/978-3-030-87178-9\_49.

6. Analysis of the Main Types of Automated Information Systems in the Transport Sector, Functioning Mainly in Urban Agglomerations / L. M. Ilchenko, S. S. Sokolov, K. V. Egorova, [et al.] // *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, (Saint Petersburg, Moscow, Russia, 26–28 January 2021). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021. — Pp. 401–406. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396630.

7. Investigation of Computer Incidents as an Important Component in the Security of Maritime Transportation / I. S. Shipunov, A. P. Nyrkov, M. U. Ryabekov, [et al.] // *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, (Saint Petersburg, Moscow, Russia, 26–29 January 2021). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021. — Pp. 657–660. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396501.

8. Information System for Monitoring and Analyzing the Technical Condition of Autonomous Vehicles / I. S. Shipunov, A. P. Nyrkov, M. V. Kardakova, [et al.] // *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, (Saint Petersburg, Moscow, Russia, 27–30 January 2020). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020. — Pp. 497–500. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039181.

9. Databases Problems for Maritime Transport Industry on Platform Highload / A. P. Nyrkov, N. B. Glebov, R. O. Novoselov, [et al.] // Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS): Proceedings of the 2018 IEEE International Conference (St. Petersburg, Russia, 24–28 September 2018). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. — Pp. 132–135. DOI: 10.1109/ITMQIS.2018.8525058.

10. Радиоуправляемая автомодель // Википедия. Посл. обновл. 01.11.2018. URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Радиоуправляемая\\_автомодель](http://ru.wikipedia.org/wiki/Радиоуправляемая_автомодель) (дата обращения 12.11.2021).

11. Уголовный кодекс Российской Федерации от 13.06.1996 (ред. от 01.07.2021 № 293-ФЗ): принят Государственной Думой 24 мая 1996 года; одобрен Советом Федерации 05 июня 1996 года.

12. Дагестанский спецназ вооружат высокотехнологичным оборудованием // Информационный портал РИА «Дагестан» — 2013. — 24 июня. URL: [http://riadagestan.ru/news/security/dagestan\\_spetsnaz\\_will\\_equip\\_high\\_tech\\_equipment](http://riadagestan.ru/news/security/dagestan_spetsnaz_will_equip_high_tech_equipment) (дата обращения 12.11.2021).

13. Optimal Identification for Objects in Problems on Recognition by Unmanned Underwater Vehicles / A. P. Nyrkov, S. S. Sokolov, O. M. Alimov, [et al.] // Automatic Control and Computer Sciences. 2020. Vol. 54, Is. 8. Pp. 958–963. DOI: 10.3103/S0146411620080234.

14. About the Problems of Ensuring Information Security on Unmanned Ships / I. S. Shipunov, K. S. Voevodskiy, A. P. Nyrkov, [et al.] // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (Saint Petersburg, Moscow, Russia, 28–31 January 2019). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. — Pp. 339–343. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8657219.

15. Что такое дрон: какие виды бывают и зачем они? // ООО «Альбатрос» — российский производитель БВС (БПЛА). — 2019. — 05 июня. URL: <http://www.alb.aero/about/articles/chto-takoe-dron-kakie-vidy-byvayut-i-zachem-oni> (дата обращения 12.11.2021).